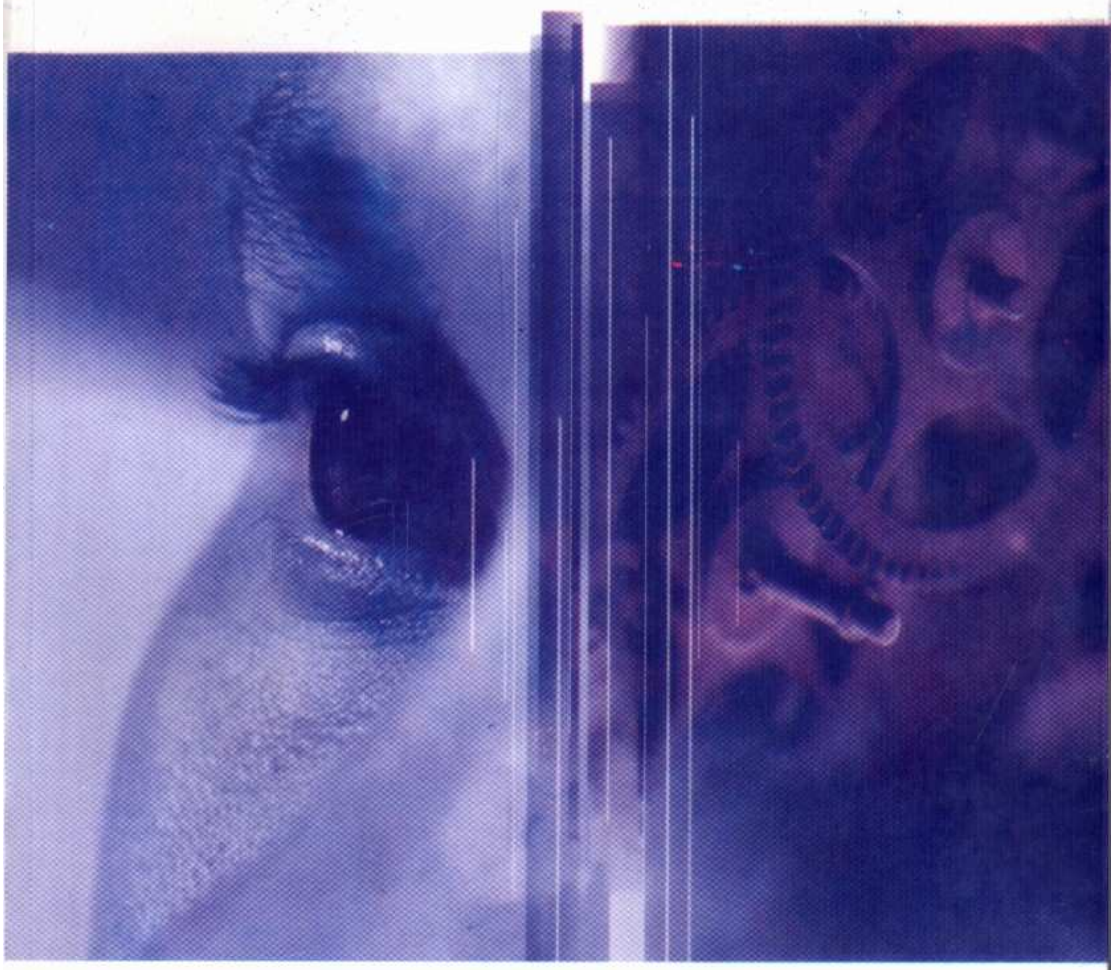
El cerebro y el mito del yo

El papel de las neuronas en el pensamiento y el comportamiento humanos



Rodolfo R. Llinás

Prólogo de Gabriel García Márquez

Vitral

GRUPO EDITORIAL norma

EL CEREBRO Y EL MITO DEL YO

EL PAPEL DE LAS NEURONAS EN EL PENSAMIENTO Y EL COMPORTAMIENTO DE LOS HUMANOS

RODOLFO R. LLINÁS

Prólogo literario

Conocí a Rodolfo Llinás hace unos diez años, en Bogotá, cuando formábamos parte de un grupo de pedagogos colombianos convocados por el gobierno para intentar una reforma orgánica de la educación. Acepte sin autoridad ni convicción, sólo por no parecer contrario a una iniciativa del presidente César Gaviria, y al buen ejemplo de veinte compatriotas bien escogidos. Me animaba además la esperanza de que los resultados disiparan mis dudas con tecnicas sobre la enseñanza formal.

Al término de dos semanas me pareció que habíamos hecho un trabajo meritorio, pero lo más importante para mi —como escritor— fue lo mucho que habia aprendido en mis conversaciones marginales con Llinás, y haber llegado a la conclusión de que teníamos en común la desmesura de nuestros propósitos personales. Para mí, que tío tengo la formación ni la vocación, fue una oportunidad más de preguntarme cómo he podido ser el escritor que soy, sin las bases académicas convencionales ni los milagros que sólo pueden vislumbrarse con los recursos sobrenaturales de la poesía. Para Llinás, en cambio, fue una ocasión más de comprobar en carne viva su inspiración científica, su inteligencia encarnizada y la certidumbre de que el ser humano terminará por ser de veras el rey de la creación, pero sólo si encontrábamos un camino muy distinto del que habíamos seguido hasta entonces.

Desde nuestra primera conversación nos sorprendió comprobar que mucho de lo que él y yo tenemos en común nos viene de nuestros abuelos —el paterno suyo y el materno mío—, que nos inculcaron una noción de la vida que más parecía un método práctico para desconfiar de la realidad y sólo admitir como cierto lo que tiene una explicación básica. Liinás había vivido esa primera experiencia cuando quiso y no pudo entender cómo funcionaba el fonógrafo. Su abuelo, que lo enseñó a leer antes de la edad convencional, había estado preso en alguna de las tantas guerras del sigla XIX y había aprendido en la cárcel las artes de relojero. No sólo le mostró cómo se enrollaba la cuerda y cómo iba desenrollándose para cumplir su destino, sino que le conseguía toda clase de juguetes mecánicos sólo para que los abriera y los desbaratara hasta entender cómo funcionaban por dentro. Sus alumnos gozaban con el esplendor de sus ejemplos, sobre todo los que tenían que ver con sus experiencias de siquiatra. Para que entendieran sin duda alguna cómo eran los ataques epilépticos se tiraba en el suelo en plena clase y los fingía con tal dramatismo que algunos llegaron a temer que fueran ciertos. Murió cuando el nieto era muy joven, como lo era yo cuando murió mi abuelo, y ambos los recordábamos y hablábamos de ellos como si continuaran vivos.

Fue un salto prodigioso en la vida de Llinás, pues hasta entonces no había hecho más que gambetas para eludir el mundo que tos mayores trataban de inculcarle a la fuerza y sin explicaciones, porque se negaba a aceptar lo que no entendía. A mí me sucedía lo mismo a esa edad, y fui el desencanto de la familia, hasta que un inspector del gobierno me hizo una serie de pruebas que me pusieron a salvo con e! diagnóstico caritativo de que yo era tan inteligente que parecía muy bruto. Lo mismo decían de Llinás, cuya primera experiencia fue en una escuela montesoriana con maestras beatas y seis niñas un poco mayores que él. "Fui el niño mal ejemplo", le he oído decir a menudo. Se aburría tanto en las clases, que su padre lo autorizó para que no volviera, aunque le señaló la importancia de persistir aunque mera por la importancia de aprender cómo eran los otros niños.

Lo mas difícil para él era tal vez la religión católica cuyos dogmas tenían que aprenderse de memoria sin entenderlos. Lo exasperaba que te prohibieran hablar en misa si no molestaba a nadie. No concebía que las bendiciones llegaran a los fieles, si eran echadas al aire por un

sacerdote que no miraba a nadie, pues en su lógica pura no debían lanzarse al azar, sino con ciertas dimensiones geométricas para que llegaran adonde el oficiante se proponía. Por estas y otras muchas razones las clases de religión sólo le sirvieron para poner en duda la existencia de Dios, porque nadie supo cómo explicárselo, ni lo ayudaron a descifrar el rompecabezas teológico de que tres personas distintas fueran en realidad un solo Dios verdadero.

Era tal su soledad en el mundo, que uno de sus amigos condiscípulos le contó años después cuánto lo odiaban en la escuela porque se iba en la bicicleta a comprar dulces en la tienda de la esquina, mientras sus condiscípulos agonizaban esperando el recreo en las clases de aritmética. Fue una edad feliz para él pero necesitó tres escuelas distintas para aprobar a duras penas los primeros tres años.

A partir de entonces su vida se dividió entre los maestros con quienes no se entendía, y los que respondían y despejaban sus dudas con naturalidad. Entre éstos, su padre, un médico tan comprensivo como su abuelo, que lo matriculó en el Gimnasio Moderno en su natal Bogotá. Allí tuvo la buena suerte de ser enseñado por ilustres maestros como Ernesto Beim que llegó a Colombia desde Alemania, y José Prat, que llegó de España.

Cuando ingresó a la Facultad de Medicina de la Universidad Javeriana graduado de bachiller en el Gimnasio, Llinás volvió a encallar con el aprendizaje de la anatomía por la parsimonia del método. El solo estudio de la osteología tardaba más de dos meses, de modo que en la disección del cuerpo humano se consumían dos años enteros. Sin embargo, los cadáveres de estudio se mantenían intactos en el anfiteatro mientras los alumnos tenían que memorizar doscientas páginas de teoría sin comprobarlas en la práctica. Desesperado, Llinás convenció al celador para que se hiciera el de la visia gorda mientras él y tres compañeros de curso se colaban a media noche por las ventanas del anfiteatro, con sus instrumentos quirúrgicos y el libro de anatomía. A toda prisa abrieron como un camisón la piel del cadáver, lo limpiaron de las grasas y lo dejaron listo para estudiar y tomar notas de cada una de sus partes antes de que saliera el sol, y sin las peroratas del maestro.

Los que encontraron el esqueleto pelado en la mesa de disección sólo pudieron entenderlo como una trapisonda del demonio. Se pensó en llevar al arzobispo para exorcizar la casa, pero en la fiebre del escándalo, Llinás el temerario y sus alegres muchachos confesaron la falta, y la justificaron con razones tan sabias que se la perdonaron sin castigo. Con el tiempo, el episodio fue un buen precedente para cambiar los métodos de la disección, y el asaltante mayor pudo terminar su año con calificaciones distinguidas.

Otra de sus instancias cruciales, ya adolescente, fue cuando viajó a los Estados Unidos como médico recién graduado para iniciar los estudios primarios de neurocirugía. No sólo lo consiguió, sino que se enfrentó con los cirujanos que trepanaban al paciente bajo anestesia local, y le operaban el cerebro sin la precaución caritativa de taparle los oídos para que no oyera los comentarios crudos que hacían entre ellos sobre los pormenores de la operación. Quizás fue entonces cuando concibió la urgencia de observar la función del cerebro sin destapar la cabeza, algo que él mismo ayudó a desarrollar años después: el magneto-encefalógrafo, un aparato milagroso que mide la actividad nerviosa del ser humano sin destapar la cabeza, y que quizás podría servir para descubrir en que lugar del cerebro se engendran los presagios.

En Australia, donde hizo su doctorado en fisiología, Llinás se empeñó en el estudio de las células nerviosas con el deseo de entender las enfermedades cerebrales que entonces no podían curarse. Y mucho mas con su creatividad voraz. Sin embargo, su lucha continúa con lo que ha sido siempre el tema central de nuestras conversaciones: cómo es que pensamos y qué es ser conscientes. Él, como científico, y yo, como escritor, ansiamos que el ser humano aprenda por fin a entenderse a sí mismo, que es un tema científico eminente cuya belleza se confunde con la poesía. "El cerebro es una máquina para soñar", ha dicho él. Es el órgano maestro que en realidad revela la verdad de las cosas: cuáles son verdes y cuáles son rojas, por ejemplo, pues en el mundo no existen los colores como los percibimos y apreciamos, sino ciertas frecuencias que interpretamos como colores. Lo mismo que el dolor que nos producen las espinas. "¿Pero es que

fuera de mi cuerpo existe el dolor?", se pregunta el mismo Llinás en voz baja. "No: es una invención de mi cuerpo para ponerme en guardia contra el dolor que él mismo ordena y puede reproducir durante el sueño y casi con la misma claridad". En realidad, ver, oír y sentir son propiedades del cerebro que los sentidos limitan y ordenan. De allí podemos vislumbrar dos planteamientos esenciales: cómo es que pensamos y qué es ser conscientes, y la única manera de entender el mundo en que vivimos es que empecemos por fin a entendernos a nosotros mismos.

Esa es la esencia de El Cerebro y el mito del yo, este libro maestro en el que Rodolfo Llinás propone la tesis casi lírica de que el cerebro, protegido por la coraza del cráneo, ha evolucionado hasta el punto de trasmitirnos imágenes del mundo externo que —a diferencia de las plantas arraigadas— nos permiten movemos en libertad sobre la cierra. Más asombroso aún: son ensueños regidos por los sentidos en la oscuridad y el silencio absolutos, que al ser elaborados por el cerebro se convierten en nuestros pensamientos, deseos y temores. O —como pudo decirlo Calderón de la Barca— es el milagro racional de soñar con los ojos abiertos.

Hace unos meses, cuando Llinás me habló por primera vez de este libro, lo encontré tan radiante por la madurez de sus conclusiones, que me atreví a provocarlo con la pregunta de siempre:

"Y entonces, ¿en qué punto estamos?". Y él me contestó con una

convicción muy suya:

—Ya es bastante saber que la realidad es un sistema vivo y que hemos llegado al punto prodigioso de saber que somos parte de él.

Ansioso, me atreví a arriesgar una última provocación creativa;

—¿Pero no te parece que todavía es un poco descorazonador?

—Tal vez —me contestó impávido—, pero ahora empezamos a tener el consuelo irrebatible de que quizás sea la verdad.

Yo, romántico insaciable, fui por una vez más lejos que él, con la certidumbre de que termine por descubrir algo que existe más allá de nuestros sueños: en qué lugar del cerebro se incuba el amor, y cuál será su duración y su desuno.

Gabriel García Márquez
Enero, 2003

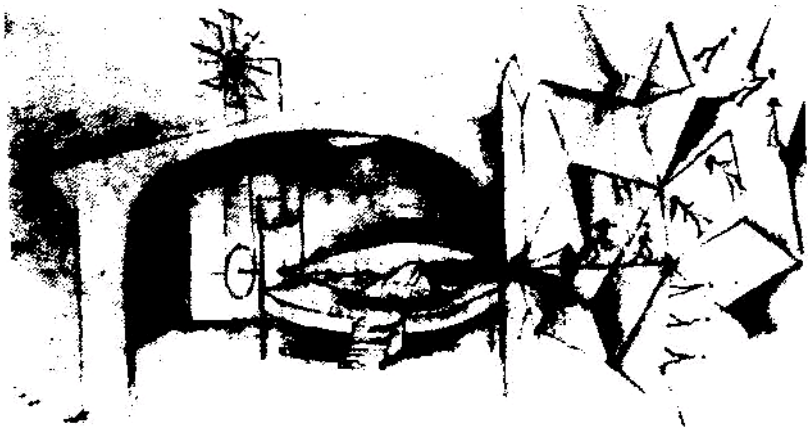
La primacía motora y la organización de las redes neuronales: el pensamiento como movimiento interiorizado

El primer paso fundamental para explorar, desde un punto de vista científico y la naturaleza de la mente es rechazar la premisa de que , ésta apareció súbitamente como resultado de una "intervención espectacular". La naturaleza de la mente debe entenderse con base en su origen, en el proceso de su desarrollo, que emana del perenne mecanismo biológico de ensayo y error. La mente, o lo que llamaré "el estado mental", es el producto de los procesos evolutivos que han tenido lugar en el cerebro de los organismos dorados de movimiento. Esta evolución cerebral se presentó de manera paulatina, desde las formas más primitivas hasta las más altamente evoluciunadas por tanto, el examen de las bases cientificas de la mente requiere una perspectiva evolutiva rigurosa, ya que es a través de este proceso como se generó la mente. Cómo llegó la rnente a nosotros (o nosotros a ella, como veremos más adelante) es una bella historia de más de 700 millones de años que, como todo lo biológico, aún no termina su arduo caminar.

Para comprender la naturaleza de la mente, el requisito primordial es disponer de una perspectiva apropiada. Así como la sociedad occidental, sumida en el pensamiento dualista, debe cambiar de orientación para captar las premisas elementales de la filosofía no dualista, también es necesario un cambio fundamental de perspectiva para abordar la naturaleza neurobiológica de la mente. Mi ciclo de charlas en las Conferencias de ex alumnos estadounidenses de St. Andrews constituyeron un intento de tal reorientación; el presente libro procederá en esta línea de pensamiento.

En su ciclo de conferencias Gifford en Edimburgo, en 1937, tituladas "Reflexiones del hombre sobre su naturaleza", Charles Sherrington (1941, capitulo 12) insinuó la posibilidad de que si algún día los seres humanos llegaran a enfrentarse cara a cara con su verdadera naturaleza, este conocimiento podría desencadenar la caída de la civilización. Evidentemente, para Sherrington, el hombre prefiere considerarse como el más bajo de tos ángeles y no el más alto de los animales. MÍ opinión es que si algún día llegáramos a comprender en su totalidad la portentosa naturaleza de la mente, de hecho, el respeto y la admiración por nuestros congeneres se verían notablemente enriquecidos.

EL CEREBRO Y EL MITO DEL YO



R.Varo.Sueño. 1958. lápiz/papel, 23 x 16cm.

1
UTILIZAR LA MENTE PARA ENTENDERLA

La mente, los estados funcionales globales del cerebro y las Imágenes sensomotoras

Al abordar la mente desde un punto de vista científico, es necesario considerar algunas pautas básicas. Como este libro no pretende sér una novela detectivesca, daré algunas definiciones del término mente O "estado mental", que demarquen los conceptos que vamos a utilizar. Desde mi perspectiva monista, el cerebro y feamente son eventos inseparables. Igual importancia que lo anterior tiene entender que la "mente", o el estado mental, constituye tan sólo uno de los grandes estados funcionales generados por él cerebro. Los estados mentales conscientes pertenecen a una clase de estados funcionales del cerebro en los que se generan imágenes cognitivas sensomotoras, incluyendo la autoconciencia. Al hablar de imágenes sensomotoras, no sólo me refiero a las visuales, sino a la conjunción o enlace de toda información sensoríal capaz de producir un estado que pueda resultar en una acción. Por ejemplo, imaginemos que sentimos un prurito en la espaldá en un sitio que no podemos ver, pero que genera una "imagen" interna con determinada idealización en el cuerpo y simultáneamente una actitud de lo que debemos hacer: ¡RASCARNOS! Esto es una imagen sensomotora. La generación de estas imágenes no constituye un mero reflejo, porque ocurre en el contexto de lo que el animal está haciendo entretanto. Por razones obvias, a un perro no se le ocurriría rascarse con una pata mientras la pata opuesta está en el airé. El contexto es, pues, tan importante como el contenido, en la generación de imágenes sensomotoras y en la formulación premotora.

Es importante recordar que en el cerebro ocurren otros estados funcionales que, aunque utilizan el mismo espacio en la masa cerebral que las imágenes sensomotoras, no generan conciencia. Entre éstos se incluye el estar dormido, drogado o anestesiado, o sufrir una crisis epiléptica generalizada. En estos estados cerebrales, la conciencia desaparece y todas las memorias y sentimientos se funden en la nada y, sin embargo, el cerebro sigue funcionando con los mismos requisitos normales de oxigenó y nutrientes, aun que no genera ningún tipo de conciencia, ni siquiera de la propia existencia (autoconciencia). No genera preocupaciones, esperanzas o temores — es el olvido total.

Sin embargo, considero que el estado cerebral global conocido como soñar es también un estado cognoscitivo, aunque no lo es con relación a la realidad externa coexistente, dado que no esta modulado por los sentidos (Llinás y Paré, 1991). Tal estado es generado o a partir de las experiencias pasadas almacenadas en el cerebro, o por el trabajo intrínseco del mismo cerebro. Otro ejemplo de estado cerebral global es aquél que se conoce como "sueno lúcido" (La Berge y Rheingold, 1990), durante el cual la persona es consciente del hecho de que está soñando.

En resumen, el cerebro es algo más que el litro y medio de materia grisácea e inerte que ocasionalmente se ve como un encurtido en frascos, sobre algún estante polvoriento de laboratorio. Por el contrario, el cerebro debe considerarse como una entidad viva que genera una actividad eléctrica definida. Tal actividad podría describirse como tormentas eléctricas "autocontroladas" o, si adoptamos el término de uno de los pioneros de la neurociencia, Charles Sherrington, como un "telar encantado" (1941, p. 225). En el contexto amplio de redes neuronales, dicha actividad es la ménte.

La mente es codimensional con el cerebro y lo ocupa todo, hasta en sus más recónditos repliegues. Pero al igual que las tormentas eléctricas, la mente no representa simultáneamente todas las posibles tormentas, sino sólo aquéllas que son isomorfas (o sea, que coinciden con la representación del mundo externo) con el estado del mundo que nos rodea mientras lo observamos y que lo reconstruyen, lo transforman y modifican. Al soñar, liberado de la tiranía de los sentidos, el sistema genera tormentas intrínsecas que crean mundos "posibles", en un proceso que quizá se asemeja al pensamiento.

El cerebro vivo, o sus tormentas eléctricas, son descripciones que representan aspectos

distintos de una misma cosa: el estado funcional de las neuronas. Hoy en día se emplean metáforas alusivas a la función del sistema nervioso central, derivadas del mundo de los computadores, tales como que "el cerebro es el hardware y la mente es el software" (ver la discusión de Block, 1995). Creo que este uso del lenguaje es completamente inadecuado. Como la mente coincide con los estados funcionales del cerebro, el hardware y el software se entrelazan en unidades funcionales, que no son otra cosa que las neuronas. La actividad neuronal constituye simultáneamente "el comer y lo comido".

Antes de volver a nuestra discusión sobre la mente, pensemos de nuevo en el pequeño punto de prurito en la espalda, en particular en el momento en el cual se genera la imagen sensomotora — antes de efectuar el evento motor de rascarse. ¿Puede el ector reconocer el sentido de lo futuro, inherente a las imágenas sensomotoras, el impulso hacia la acción por realizarse? Se trata de un punto de gran importancia que constituye uno de los pilares ancestralmente fundamentales de la mente. En los albores de la evolución biológica encontramos ya este impulso, esta fuerza directriz, esta intencionalidad que desemboca en las imágenes sensomotoras y, en última instancia, en la mente y en el yo. Mas aún, el titulo del libro habla de "el mito del yo". Para mi tal mito es la existencia de un yo separable de la función cerebral. Si dijéramos "el cerebro nos engaña" la implicación sería que mi cerebro y yo somos cosas diferentes. La tesis central de este libro es que el yo es un estado funcional del cerebro y nada más ni nada menos.

Continuemos la discusión con un poco más de precisión. Propongo que el estado mental, represente o no (como en los sueños o en lo imaginario) la realidad externa, ha evolucionado como un instrumento que implementa las interacciones predictivas y/o intencionales entre un organismo vivo y su medio ambiente. Para que tales transacciones tengan éxito, se requiere un instrumento "precableado", genéticamente transmitido, que genere imágenes internas del mundo externo, que puedan compararse con la información que éste nos proporciona a través de los sentidos. Además, estas imágenes internas deben cambiar continuamente, a la misma velocidad con que cambia la información sensorial proveniente del mundo externo, y todo esto debe realizarse en tiempo real. Por percepción se enriende la validación de las imágenes sensomotoras generadas internamente por medio de la información sensorial, que se procesa en tiempo real y que llega desde el entorno que rodea al animal. La base de la predicción —que es la expectativa de eventos por venir— es la percepción. La predicción, función tan radicalmente diferente del reflejo, constituye la verdadera entraña de la función cerebral.

¿Por qué es la mente tan misteriosa?

¿Por qué nos parece la mente tan misteriosa? ¿Por qué ha sido siempre así? Supongo que la razón por la cual el pensamiento, la conciencia y los sueños resultan tan extraños radica en que parecen generarse sin relación aparente con el mundo externo. Todo aquello parece ser impalpablemente interno.

En una conferencia en la Escuela de Medicina de la Universidad de Nueva York, realizada en honor del fallecido profesor Homer Smith, titulada "Unidad del diseño orgánico; de Goethe y Geoffrey Chaucer a la homólogia entre complejos homeóticos en artrópodos y vertebrados", Stephen J. Gouid mencionó la conocida hipótesis de que nosotros, los vertebrados, podemos considerarnos como crustáceos volteados hacia fuera. Somos endoesqueléticos, o sea, tenemos un esqueleto interno; los crustáceos son exoesqueléticos, es decir, tienen un esqueleto externo.

Tal idea me llevó a considerar lo que hubiera sucedido si hubiéramos permanecido exoesqueléticos. En tal caso, el concepto de cómo se genera el movimiento podría resultarnos tan incomprensible como lo es el concepto de pensamiento o de mente. Tener un esqueleto interno

implica que, desde que nacemos, somos altamente conscientes de nuestros músculos, puesto que los vemos moverse y palpamos sus contracciones. Definitivamente, comprendemos, de una manera muy íntima, la relación entre la contracción muscular y el movimiento de las diversas partes del cuerpo. Por desgracia, nuestro conocimiento acerca del funcionamiento del cerebro no es directo. ¿Por qué no? Porque, en lo que a masa cerebral se refiere, somos crustáceos: ¡nuestros cerebros y medula espinal están cubiertos por un exoesqueleto implacable! (figura 1.1).

Figura 1.1

Detalle que muestra lo cabeza y la porte superior del torso, de un dibujo del natural, de Leonardo do Vinci, con la imagen superpuesta de un cerebro.

Si pudiéramos observar o sentir el funcionamiento del cerebro, nos resultaría obvio que la relación entre la función cerebral y la manera como vemos, interpretamos o reaccionamos es tan estrecha como la que existe entre las contracciones musculares y los movimientos efectuados. En cuanto a nuestros amigos los crustáceos, quienes no se dan el lujo de conocer en forma directa la relación entre la contracción muscular y el movimiento, el problema de cómo se mueven, en caso que pudieran considerarlo, podría resultarles tan inexplicable como lo es para nosotros el pensamiento o la mente. El punto esencial es que sabemos acerca de los músculos y tendones y, de hecho, disfrutamos lanto de ellos, que organizamos competencias mundiales para comparar masas musculares simétricamente hipertrofiadas a fuerza de levantar pesas obsesivamente (y, ocasionalmente, de ingerir esferoides). Lo anterior. a pesar de que en la relación fuerza física/masa corporal, com-parados con los demás animales, nos encontramos en los peldaños inferiores. Los que exploran más analíticamente emplean metros, escalas y transductores de fuerza, tratando así de describir las propiedades de estos preciosos órganos del movimiento.

Sin embargo, no se dispone de una parafernalia análoga para medir directamente el funcionamiento del cerebro (a pesar de las pruebas de cociente intelectual). Tal vez por esta razón, en la neurociencia se dan conceptos muy diversos acerca de cómo se organiza füncíonalmente el cerebro.

Perspectivas históricas acerca de la organización motora del cerebro

Hacia comienzos del siglo pasado se originaron dos perspectivas, sólidas pero opuestas, respecto de la ejecución del movimiento. La primera, cuyo adalid era William James (1890), consideraba la organización funcional del sistema nervioso central en términos puramente reflexológicos. Este punto de vista suponía que el cerebro es esencialmente un complejo sistema de entrada/salida, impelido por las demandas momentáneas del medio. La sensación debe

impulsar el movimiento, cuya generación es fundamentalmente una respuesta ante la serial externa. Esta idea básica tuvo gran influencia en los estudios pioneros de Charles Sherrington y su escuela (1948), e impulsó el estudio de los reflejos centrales —su función y su organización— y, en último término, el estudio de la transmisión sináptica y de la integración neuronal. Los anteriores conceptos han desempeñado un papel crucial en la neurociencia contemporánea.

La segunda perspectiva influyente fue liderada por Graham Brown (1911, 1914, 1915), quien no creía que la medula espinal tuviera una organización fundamentalmente refleja. Según Brown, la organización de dicho sistema es autorreferencial y se basa en circuiros neuronales que impulsan la generación de los patrones eléctricos necesarios para el movimiento organizado. Para llegar a esta conclusión, Brown se sustentó en sus estudios sobre la locomoción en animales deaferentados, o sea, a los cuales se les han seccionado los nervios que llevan sensaciones de las piernas a la medula espinal pero que, sin embargo, pueden generar una marcha organizada (Brown, 1911). Esto lo llevó a proponer que, incluso el movimiento organizado, se genera intrínsecamente sin necesidad de entradas sensoriales. Brown consideraba que la actividad refleja sólo se necesitaba para modular la marcha generada intrínsecamente. Así, por ejemplo, aunque la locomoción (un paso después de otro) se organiza intrínsecamente, la información sensorial (v. gr., ¡un área resbalosa en e! piso!) cambia el ritmo en forma refleja, de modo que no caigamos al suelo.

Posteriormente, Brown propuso que la locomoción se produce en la medula espinal en virtud de la actividad neuronal reciproca. En términos muy simplificados, las redes neuronales autónomas de un lado de la medula espinal activan los músculos del miembro del mismo lado, a la vez que impiden la actividad del miembro opuesto. Brown describió esta organización recíproca como "hemícentros apareados" (1914), ya que su interacción mutua regula el ritmo de alternancia entre miembro derecho y miembro izquierdo, que es lo que constituye la locomoción (ver la figura 2.5, más adelante).

En este contexto, la entrada sensorial no da lugar a la marcha; tal reflejo tan sólo modula la actividad de la red neuronal de la medula espinal y permite adaptar la marcha a las irregularidades del terreno por el que se mueve un animal. Hoy sabemos que, en los vertebrados, tal actividad, gestada en la función eléctrica intrínseca de las neuronas de la medula espinal y del tallo cerebral, constituye el fundamento de la respiración (Feldman et al, 1991) y de la locomoción (Stein et al., 1998; Cohén, 1987; Grillner y Maisushima, 1991; Lansner et al., 1998). La organización dinámica de los invertebrados es semejante, pero su disposición anatómica es muy diferente (Marder.1998). Sin embargo, tanto en vertebrados como en invertebrados, las propiedades dinámicas de la actividad neuronal sináptica son análogas.

La propuesta de Brown es altamente apreciada entre muchos investigadores, pues ha sido crucial para comprender la actividad intrínseca de las neuronas centrales (Llinás, 1974, 1988; Stein et ai. 1984). Esta concepción de la función de la medula espinal puede generalizarse al funcionamiento del tallo cerebral y de regiones relacionadas con una función cerebral superior, tales como el tálamo y la corteza cerebral, áreas fundamentales para que se genere la mente, aun a pesar de las vicisitudes del mundo externo.

La naturaleza intrínseca de la función cerebral

Hace ya algún tiempo propuse una hipótesis de trabajo (Llinás, 1974) relacionada con las ideas de Brown, según la cual la función del sistema nervioso central podría operar independientemente, en forma intrínseca, y que la entrada sensorial, más que informar, modularía este sistema semicerrado. Me apresuro a decir que la ausencia de entrada sensorial no es el modo operativo normal del cerebro, como todos lo sabemos cuando, de niños, observamos por primera vez el comportamiento de una persona sorda o ciega. Sin embargo, también sería erróneo decir que el extremo opuesto es cierto: para generar percepciones, el cerebro no depende de una entrada continua de señales del mundo externo (ver El último hippie de Oliver Sacks); los

sentidos se necesitan para modular el contenido de las percepciones (inducción) pero no para la deducción. Propongo que, como el corazón, el cerebro opera como un sistema autorreferencial, cerrado al menos en dos sentidos: en primer lugar, como algo ajeno a la experiencia directa, en razón del cráneo, hueso afortunadamente implacable; en segundo lugar, por tratarse de un sistema básicamente autorreferencial, el cerebro sólo podrá conocer el mundo externo mediante órganos sensoriales especializados. La evolución sugiere que estos órganos especifican estados internos que reflejan una selección determinada de circuitos neuronales, realizada según el método ancestral de ensayo y error. Tales estados pasaron a formar parte de la predeterminación genética (por ejemplo, no tenemos que aprender a ver colores). Al nacer, estos circuitos ancestrales ya presentes (que comprenden la arquitectura cerebral funcional heredada) se enriquecen gradualmente en virtud de nuestras experiencias como individuos y, por ende, constituyen nuestras memorias particulares, que de hecho nos constituyen nuestro sí mismo.

Como veremos, el mundo de la neurología brinda apoyo al concepto del cerebro como sistema cerrado. En tal tipo de sistema, la entrada sensorial desempeñaría un papel más importante en la especificación de los estados intrínsecos (contexto) de actividad cognoscitiva, que en el puro suministro de "información" (contenido). Lo anterior equivale, ni más ni menos, al ejemplo en el cual una entrada sensorial modula el patrón de actividad neuronal generado en la medula espinal, que produce la marcha. Sólo que aquí nos referimos a un estado cognoscitivo generado por el cerebro y al modo como la entrada sensorial lo modula. El principio es el mismo. Pongamos por caso la prosopagnosia, condición en la que, debido a una lesión neurológica, se pierde la capacidad de reconocer caras humanas. Estas personas pueden ver y reconocer las diferentes partes de la cara, pero no reconocen las caras como entidades en sí, es decir, el sistema intrínseco que reconoce no funciona (Damasío et al., 1982; De Renzi y Pellegrino, 1998) y por lo tanto, las caras como tal, son una creación del cerebro. Más aún, los habitantes de los sueños de los prosopagnósicos carecen de caras (Llinás y Pare, 1991). Más adelante volveremos a este problema.

El significado de las señales sensoriales se expresa principalmente en su incorporación a entidades o estados cognoscitivos de más amplia envergadura. En otras palabras, las señales sensoriales adquieren representación gracias a su impacto sobre una disposición funcional preexistente del cerebro (Llinás, 1974,1987), concepto éste que constituye un problema mucho más profundo de lo que podría pensarse a simple vista, particularmente si se examinan cuestiones acerca de la naturaleza del "sí mismo".

Propiedades eléctricas intrínsecas del cerebro: oscilación, resonancia, ritmicidad y coherencia

¿Cómo pueden las neuronas centrales organizar e impulsar el movimiento del cuerpo, crear imágenes sensomotoras y generar pensamientos? Con mayores conocimientos de los que tuviera Brown en sus días, podemos parafrasear la anterior pregunta en los siguientes términos: ¿Cómo se relacionan las propiedades intrínsecas oscilatorias de las neuronas centrales con las propiedades informativas del cerebro como un todo? Antes de responder a la pregunta, nos quedan aún algunos términos por aclarar. Por tratarse de un concepto .crucial para el tema del presente libro, comenzaré por explicar, en términos relativamente no técnicos, qué se entiende por propiedades intrínsecas oscilatorias del cerebro.

Oscilación

La palabra "oscilación" nos trae a la mente algún evento rítmico de vaivén. Los péndulos, asi como los metrónomos, oscilan, y se dice de ellos que son osciladores periódicos. El movimiento ondulatorio de la cola de una lamprea al nadar es un maravilloso ejemplo de movimiento oscilatorio (Cohén, 1987; Grillner y Matsushima, 1991).

Muchas clases de neuronas del sistema nervioso están doradas de tipos particulares de actividad eléctrica intrínseca que les confiere propiedades funcionales características. Esta actividad eléctrica se manifiesta como variaciones diminutas de voltaje (del orden de milésimas de voltio) a través de la membrana que rodea a la célula (la membrana plasmática neuronal) (Llinás, 1988). Estas oscilaciones recuerdan las ondas sinusoidales que forman suaves ondulaciones en aguas tranquilas. Como veremos más adelante, estas ondulaciones tienen la característica de ser ligeramente caóticas (Makarenko y Llinás, 1998), es decir que muestran propiedades dinámicas no lineales, lo cual confiere al sistema, entre otras características, una gran agilidad témporal. Dichas oscilaciones de voltaje permanecen en el vecindario del cuerpo y las dendritas de la neurona, su rango de frecuencias abarca desde menos de una a más de cuarenta oscilaciones por segundo y sobre ellas, en particular sobre sus crestas, es posible evocar eventos eléctricos mucho más amplios, conocidos como potenciales de acción. Se traía de señales poderosas que pueden recorrer grandes distancias y que conforman la base de la comunicación entre neuronas. Además, los potenciales de acción constituyen los mensajes que viajan a través de los axones de las neuronas (fibras de conducción que constituyen los canales de información del cerebro y de los nervios periféricos del cuerpo). Al llegar a la célula blanco, estas señales eléctricas generan en ella pequeños potenciales sinápticos (cambios del voltaje de membrana transitorios y locales) que añaden o sustraen carga eléctrica a la oscilación intrínseca de la célula receptora. Las propiedades intrínsecas oscilatorias y los potenciales sinápticos que modifican tal actividad, constituyen el lenguaje básico empleado por las neuronas para lograr un mensaje propio, en forma de potencial de acción, el cual es enviado a otras neuronas o a fibras musculares. Así, en el caso del músculo, el acervo total de posibles conductas de un animal se genera mediante la activación de potenciales de acción en las motoneuronas, que a su vez activan los músculos, y en última instancia, generan los movimientos (la conducta). Estas motoneuronas, por su parte, reciben mensajes de otras (figura 1.2).

Las crestas y valles de las oscilaciones eléctricas neuronales pueden determinar los altibajos en la sensibilidad de la célula a señales sinápticas. En cualquier momento pueden determinar si la célula optará por responder a la señal eléctrica que llega, o si la ignorará totalmente. Como se discutirá en mayor profundidad en el capítulo 4, este intercambio oscilatorio de actividad eléctrica no sólo es muy importante para la comunicación entre neuronas y para la totalidad de la función cerebral, sino que es el eslabón de unión mediante el cual el cerebro se organiza funcional y arquitectónicamente durante su desarrollo. De hecho, en la mayoría de los casos, la actividad neuronal simultánea marca la pauta de la operación cerebral, y la oscilación neuronal permite que tal simultaneidad ocurra en forma predecible. Pero, como en toda oscilación, tal simultaneidad es discontinua, como un reloj en el cual los engranajes se mueven de modo simultáneo pero discontinuo en el tiempo, generando su característico tictac.

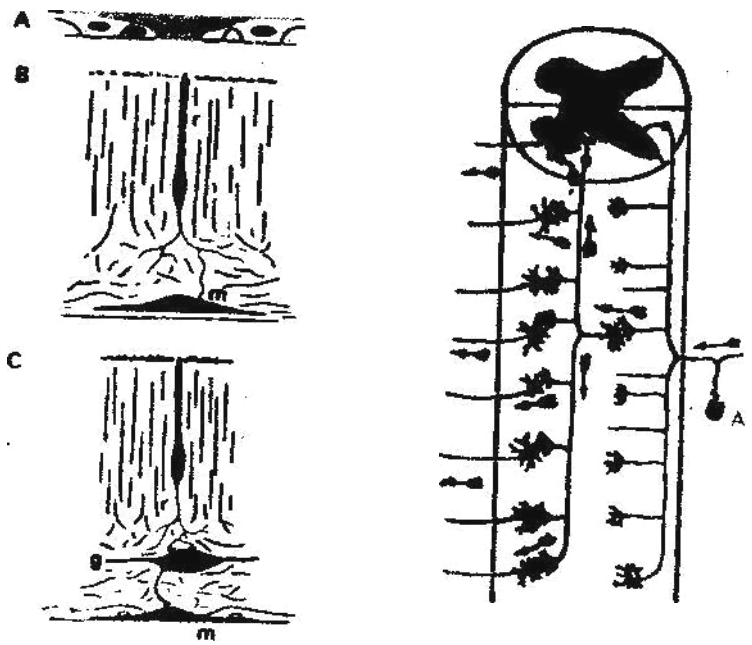


Figura 1.2

Evolución filogenética del sistema nervioso. En sentido estricto, una interneurona es cualquier célula nerviosa que no se comunique directamente con el mundo externo, bien sea a través de un órgano sensorial (una neurona sensoriol) o a través de una terminal motora muscular (neurona motora). Asi pues, las interneuronas reciben y envían información sólo a otras células nerviosas. Su evolución y desarollo representan el fundamento de la elaborada evolución del sistema nervioso central. Los diagramas de la figura representan estadios de desarrollo en invertebrados primitivos. En (A), una célula móvil (anaranjada) de un organismo primitivo (una esponja) responde con una onda de contracción a la estimulación directa. En (B) en organismos primitivos algo más evolucionados (v. g.. la anémona de mar) se han segregado las funciones sensoriales y contráctiles de lo célula A en dos elementos; "r" es el receptor o célula sensoria! (verde) y "m" es el músculo o elemento contráctil (rojo). Lo célula sensorial responde a los estimulos y sirve de neurona motora, pues desencadeno contracciones en la célula muscular. Sin embargo, por haberse especializado, esta célula sensorial ya no es capaz de generar movimiento (contracción) por sí misma. En este estadio, su función es la de recibir y transmitir información. En (C), se ha interpuesto otro neurona (azul) entre el elemento sensorial y el músculo (también en uno anémona de mar). Esta célula (motoneurona) activa las fibras musculares (m) pero sólo responde a la activación de la célula sensorial (Parker.1919). En (D), conforme progresa la evolución del sistema nervioso (el ejemplo muestra la medula espinal de los vertebrados), muchas células se Interponen entre los neuronas sensoriales (A) y las motoras (B). Éstos son las interneuronas que distribuyen la información sensorial (flecha de A), mediante sus múltiples ramificaciones (flechas de C). hacia las neuronas motoras o hacia otras neuronas de) sistema nervioso central. (Adaptado de Ramón CaJal,1911.)

Coherencia, ritmicidad y resonancia

Las neuronas, cuyo comportamiento es rítmico y oscilatorio, pueden impulsar la actividad de otras neuronas mediante potenciales de acción, conformando así grupos neuronales que oscilan en fase, es decir en forma coherente, que es la base de la actividad simultánea (algo así como lo que ocurre en la marcha de los desfiles militares, en el ballet o en las danzas de grupo).

La coherencia conforma el medio de transporte de la comunicación. Imaginemos una

apacible noche de verano en el campo. En medio de la serena plenitud, se deja oír primero una cigarra, luego otra y pronto se tendrá un sonar continuo. Más aún, este sonido puede ser rítmico y al unísono (nótese que para ello todas deben tener un reloj interno semejante, que les indique cuándo deben emitir el ruido la próxima vez, mecanismo éste que se denomina un "oscilador intrínseco"). La primera cigarra puede llamar para ver si hay algún pariente cerca. Pero el unísono continuo y rítmico de muchas cigarras se convierte en un estado o, literalmente hablando, en un conglomerado funcional unificador que permite un volumen de sonido mayor que el generado por un solo individuo y, por lo tanto, éste tendrá una mayor área de difusión. Desde el punto de vista de la comunidad global, la información montada sobre sutiles fluctuaciones en la ritmicidad se transfiere a numerosos individuos ubicados remotamente. Eventos semejantes ocurren en ciertos tipos de luciérnagas que sincronizan la actividad de sus destellos iluminando los árboles en forma titilante, a la manera de las luces de los árboles de Navidad.

Este fenómeno de oscilación en fase en el que elementos dispersos funcionan juntos, como si fueran uno solo, pero de manera amplificada, se conoce como resonancia y ocurre entre elementos con características dinámicas similares. Esta actividad también se encuentra en las neuronas. De hecho, un grupo local de neuronas que resuenen en fase entre sí, también pueden hacerlo con otro grupo distante de neuronas afines (Llinás, 1988;Hutcheon y Yaron, 2000). Tal vez la forma más primitiva de comunicación entre neuronas es la resonancia eléctrica, propiedad ésta que resulta de la conectividad eléctrica directa entre células (como ocurre con el corazón, que funciona como una bomba, en virtud de las contracciones simultáneas de todas sus fibras musculares). Posteriormente, en la evolución, aparece la transmisión química, con los delicados matices que la caracterizan, aumentando la flexibilidad y afinando la comunicación neuronal.

No todas las neuronas resuenan de manera continua. Una de las propiedades fundamentales de las neuronas es la capacidad de modificar su actividad eléctrica oscilatoria, de tal manera que en un momento dado pueden oscilar o no oscilar. De lo contrario, las neuronas no serían capaces de representar la realidad del mundo externo, siempre en continuo cambio. Cuando diversos grupos de neuronas, con patrones oscilatorios de respuesta, "perciben" o codifican diferentes aspectos de una misma señal de entrada, podrán unir sus esfuerzos para resonar en fase uno con otro (como los gritos de "ole" en la plaza de toros o de "gol" en el estadio de fútbol), fenómeno éste que se conoce como coherencia neuronal oscilatoria. Como veremos más adelante, la raíz de la cognición se encuentra en la resonancia, la coherencia y la simultaneidad de la actividad neuronal, generadas no por azar, sino por la actividad eléctrica oscilatoria. Más aún, tal actividad intrínseca conforma la entraña misma de la noción de algo llamado "nosotros mismos".

Volviendo de nuevo a la pregunta original acerca de las propiedades intrínsecas neuronales y su relación con la conciencia, se podría proponer que la sensibilidad eléctrica intrínseca de las

neuronas y de las redes que entretejen genera las representaciones internas de lo que ocurre en el mundo exterior. La actividad sensorial especifica e) detalle pero no el contexto de dichos estados. La función cerebral tendría por consiguiente dos componentes: uno, el sistema privado o "cerrado" ya discutido, responsable de cualidades tales como la subjetividad y la semántica; otro, el componente "abierto", responsable de las transformaciones sensomotoras, que ponen en relación el componente privado con el mundo extemo (Llinas, 1974, 1987). Dado que en general el cerebro opera como un sistema cerrado, debe considerársele como un emulador de la realidad y no como un simple traductor.

Con esto en mente, proponemos que la actividad intrínseca eléctrica de los elementos del cerebro (las neuronas y su compleja conectívidad) conforma una entidad o estructura funcional isomorfa con la realidad externa. Dicha entidad debe ser tan ágil como la realidad objetiva con la cual interactuamos. ¿Cómo estudiar una estructura funcional tan compleja como ésta? Primero, debemos generar modelos plausibles de cómo el cerebro puede estar implementando la transformación de lo sensitivo en lo motor, y, para esto, tenemos que tener una idea muy clara de qué es lo que la mente realmente hace. Si, a modo de hipótesis de trabajo, decidimos que esta estructura funcional cerebral debe conferir propiedades de emulación de la realidad, se impone

considerar qué tipos o modelos podrían sustentar tal función.

Comencemos considerando una mediante fuerza muscular (contráctil), aplicada a los huesos unidos entre sí por bisagras (articulaciones). Podríamos estudiar las propiedades transformacionales, cuantificando el desplazamiento físico producido por contracción muscular durante un movimiento dado (o en términos matemáticos, un vector). ASÍ, el conjunto de todas las contracciones musculares implicadas en dicho movimiento (o en cualquier otra respuesta) se efectuaría en un "espacio de coordenadas vectoriales". Visto así, los patrones de actividad eléctrica que cada neurona genera en la formación de un patrón motor (o de cualquier otro patrón interno en el cerebro), deben estar representados en el cerebro sobre un espacio geométrico abstracto. Es en este espacio de coordenadas vectoriales donde la entrada sensorial se transforma en una salida motora (Pellionisz y Llinás, 1982). Si esto le suena un poco complicado, es posible que se aclare leyendo el contenido del recuadro 1.1.

¿Cómo emergió la mente en la evolución?

Volvamos al primer punto del presente capítulo, a saber: que la mente no apareció de pronto completamente formada. Algo de reflexión e información pertinente nos ayudará a reconocer que la evolución biológica ha dejado un sendero bien delineado de indicios acerca del origen del cerebro. Si se concede que la mente y el cerebro son una sola cosa, entonces la evolución de tan singular función ciertamente debe haber coincidido con la del sistema nervioso y, por tanto, las fuerzas impulsoras de su evolución deben ser las mismas que conformaron y determinaron la mente. Esto plantea preguntas claras. ¿Cómo y por qué evolucionó el sistema nervioso? ¿Cuáles fueron las elecciones criticas que tuvo que hacer la naturaleza a lo largo del tiempo?

Comenzó en un momento crítico

El primer problema que debe considerarse es si contar con un sistema nervioso es algo realmente necesario para toda vida organizada que trascienda al organismo unicelular. La respuesta es negativa. Los organismos vivos que no se desplazan activamente como un todo, incluyendo los individuos sésiles como las plantas, han evolucionado exitosamente sin sistema nervioso.

Tenemos pues el primer indicio: el sistema nervioso sólo es necesario en animales multicelulares (que no sean colonias celulares) que instrumenten y expresen algún movimiento activo dirigido — propiedad biológica conocida como "motricidad". Tenemos pues el primer indicio: el sistema nervioso sólo es necesario en animales multicelulares (que no sean colonias celulares) que instrumenten y expresen movimientos translacionales activos. Es interesante anotar que las plantas, que tienen un sistema circulatorio bien organizado (mas no tienen corazón), aparecen en la evolución con posterioridad a la mayoría de los animales primitivos; es como si los organismos sésiles, de hecho, hubieran decidido no tener sistema nervioso. Aunque ésta pueda parecer una aseveración bastante extraña, los hechos son irrefutables. A pesar de la existencia de la planta carnívora Dionae, la mimosa y otras plantas que presentan movimientos entre sus partes, tales formas no se desplazan de un lugar a otro de manera activa, es decir, carecen de motricidad.

Recuadro 1.1

Representación abstracta de lo realidad

Imaginemos un cubo hecho de un material eléctricamente conductivo; de consistencia gelatinosa, colocado dentro de un recipiente esférico de vidrio, en formo de pecera. Supongamos, además, que en la superficie del recipiente hay pequeños contactos eléctricos que permiten el

paso de comente eléctrica entre un contacto y otro o través de lo gelatina. Supongamos que cuando pasa comente de manera repetida entre los contactos eléctricos la gelatina se condenso formando delgados filamentos conductores: y que cuando durante un cierto tiempo se suspende el flujo de corriente, la gelatina regresa al estado de gel amorfo.

Supongamos ahora que pasamos corriente entre algunos contactos conectados a uno o más sistemas sensoriales capaces de transformar un estado externo complejo (digamos jugar fútbol) y otros contactos relacionados con un sistema motor. Veremos entonces que emerge un denso conjunto de conductores en forma de cables, que permiten que las entradas sensoriales activen la salida motora. (Téngase en cuenta que estos "cables" no interactúan entre si — están aislados como lo están lo mayoría de las fibras del cerebro, por lo cual no hay cortocircuitos. Sin embargo, los cables pueden ramificarse y generar una intrincada motriz de conexiones.) Conforme se generan más entradas sensoriales complejas, más solidas motoras complejas resultarán. Resumiendo, dentro de esta suerte de "acuario" se producirá una verdadera selva de "cables" que crecerán, o en su caso, se disolverán si no se repiten los estímulos por un periodo de tiempo determinado. Este enjambre de cables seria el medio que relacionaría ciertos impulsos sensoriales (en principio todo lo que puedo ser captado y transducido por los sentidos, que es lo que denominamos universales) con impulsos motores adecuados. Como ejemplo hipotético el artefacto descrito podria usarse para controlar un robot que juegue fútbol (los algoritmos de propagación retrógrada tienen esta forma general).

Examinando el recipiente en Forma de pecera podemos entender que alli, en algún sitio de la intrincado geometría de cables, se encuentran las reglas del fútbol, pero se hallan en una geometría muy diferente de la del fútbol propiamente dicho. La mera inspección directo del recipiente no permite comprender que, en realidad, ese "cableado" particular representa tal cosa. El "fútbol" se holla representado en una geometría diferente de aquélla en lo que lo está "en la realidad externa", y por si fuera poco, está representado en una geometría abstracta en lo que no hay piernas, arbitros o bolones. sólo cables. Asi pues, el sistemo es isomorfo (puede representar el juego del fútbol) a pesar de no ser homomorfo con él (no tiene lo apariencia del juego de fútbol). El problema es análogo al de una cinta de video, la cual. por mucho que se examine directamente con los sentidos, no ofrece claves acerco de los detalles de la película integrada en su código magnético. Tenemos en este caso uno representación de! mundo extemo en la que sistemas intrínsecos de coordenadas transforman una entrada (un evento sensorial en una solida apropiada (una respuesta motora), recurriendo a los elementos dinámicos de los órganos sensoriales y la "planta" motara, el conjunto total de músculos y articulaciones o su equivalente. Tales transformadas vectoriales deben ser independientes de las características de los coordenados que los realizan, tonto en número como en su geometria {que puede ser oblicua (no cartesiano)}. Es decir, deben ser tensoriales y no lineares {como la teoría general de la relatividad}. Esta transformación sensomolora (Pellionisz y Llinás, 1982) es la esencia de lo función cerebral, es decir, ¡lo que el cerebro hoce para ganarse la vida!

¿Dónde comienza la historia? ¿Qué tipo de criatura brindará apoyo a esta importante conexión entre los primeros destellos de! sistema nervioso y los individuos móviles, por oposición a los que son sésiles? Un buen punto de partida nos lo ofrecen las Ascidiaceae primitivas, organismos tunicados que representan una fascinante coyuntura con nuestros propios ancestros cordados (con una verdadera espina dorsal) (figura 1.3).

La forma adulta de este organismo es sésil, adherida por su pedúnculo a algún objeto estacionario (Romer, 1969; Millar, 1971; Cloney, 1982). Durante su vida cumple con dos funciones básicas: se alimenta filtrando agua marina y se reproduce por gemación. La forma larval, con un ganglio semejante a un cerebro con unas 300 células, atraviesa un breve período natatorio (en general de un día o menos) (Romer, 1969; Millar, 1971; Cloney, 1992). Este sistema nervioso primitivo recibe información sensorial del exterior mediante un estatocisto (órgano de equilibrio), un parche rudimentario en la piel sensible a la luz y un notocordio (medula espinal primitiva) (figura 1.4, a la derecha). Tales características le permiten a esta

especie de renacuajo afrontar las vicisitudes del mundo en constante cambio en el cual nada. Cuando encuentra un sustrato adecuado (SvaneyYoung, 1989;Young, 1989; Stoner, 1994), procede a enterrar la cabeza en la ubicación elegida y, de nuevo, se torna sésil (Cloney, 1982; Svane yYoung, 1989; Young, 1989). Una vez reinsertada en el objeto estacionario, la larva absorbe, literalmente digiere, la mayor parte de su cerebro, incluyendo el notocordio. También digiere su cola y la musculatura correspondiente, con lo cual regresa a un estadio adulto bastante primitivo: sésil y sin un verdadero sistema nervioso central. Las células nerviosas que quedan enervan el intestino (que se mueve pero no se desplaza) y son apenas las necesarias para la sencilla actividad de filtrar agua (Romer, 1969; Miliar, 1971; Cloney, 1982). La lección de lo anterior es clara e indica que el desarrollo evolutivo del sistema nervioso es una propiedad exclusiva de los organismos activamente móviles.

El concepto básico que se deriva de lo anterior es que en anímales primitivos el cerebro es un requisito evolutivo para el movimiento guiado. Y la razón de ello es obvia, ya que, sin un plan interno, sujeto a una modulación sensorial, el movimiento activo resulta peligroso. Si se intenta caminar cierta distancia con los ojos cerrados, incluso en un corredor bien protegido y despejado, ¿qué tan lejos se irá antes de que sea inevitable abrir los ojos? La evolución de! sistema nervioso suministró un plan compuesto de predicciones, la mayoría de las cuales, aunque muy breves, se orientan hacia una meta y se verifican momento a momento mediante la entrada sensorial. Con esto, el animal puede moverse activamente en determinada dirección según un cálculo interno —una imagen sensomotora transitoria— de lo que puede encontrar afuera. Ya en este momento, debería ser clara la siguiente pregunta en nuestra investigación acerca de la evolución de la mente. ¿Cómo evolucionó e! sistema nervioso para adquirir la capacidad de ejecutar la sofisticada tarea de predecir?

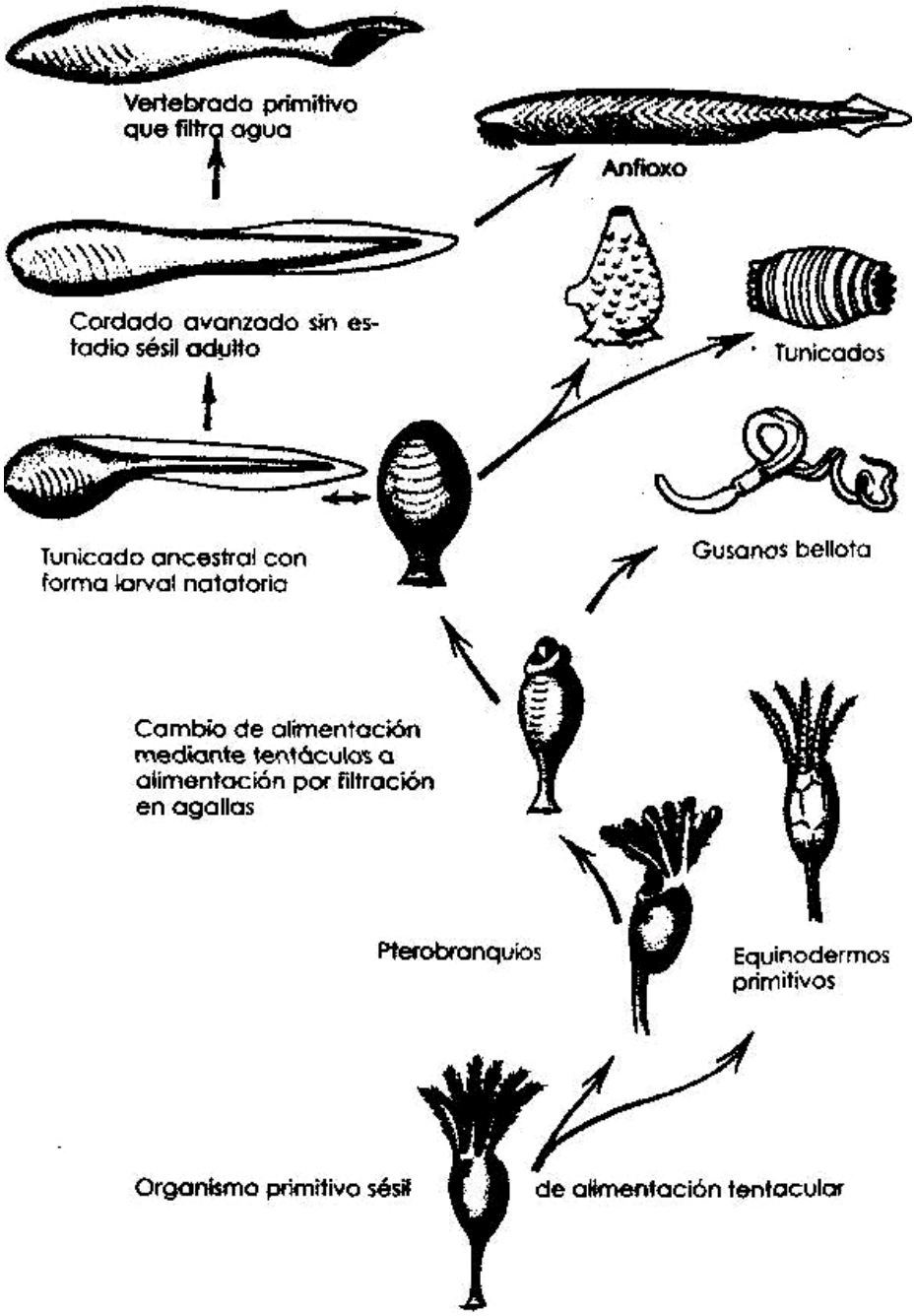


Figura 1.3

Diagrama simplificado de le evolución de los cordados: los tunicados (Ascidiaceae. ver figura 1.4) representan un estadio en el cual las agallas han sufrido una importante evolución en el adulto sésil, mientras que, en algunas especies, el estadio larval es natatorio y muestra las características avanzadas de la nolocordo y de la medula espinal asociadas al desplazamiento dirigido, ver el texto para más detalles. (Adaptado de Romer, 1969. p. 30.)

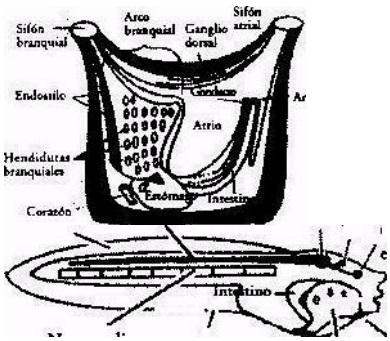


Figura 1.4

Tunicados con estadio adulto sésil, en el que filtran agua como modo de alimentación y en el que se encuentran sujetos a un sustrato (izquierda) y, en muchos casos, con un breve estadio larval natatorio (derecna). (Abajo a la izquierda) Diagrama generalizado de un tunicado solitario adulto. La porción externa negra es su "túnica" protectora. (Abajo a la derecha). Diagrama de la formo larval natatoria, especie de renacuajo, de un típico tunicado marino. Se observa un intestino, agallas y una estructura branquial, pero éstas no son ni funcionales ni abiertas. Ver texto para detalles (tomado del sitio web wws.animalnetwotk.cora/fiah/aqfm/1997).

La tenista profesional Gabriela Sabatini devuelve un servicio. Fotografía reimpresa por cortesía de Alan Cook, alcookBsprintraail.cora. hctp:// alancook. 5 Ompegs, com.

2
La predicción es la función primordial del cerebro

¿Por qué debe predecir el cerebro?

En el capítulo 1 se vio que sólo los organismos vivientes con movimiento activo y dirigido necesitan cerebro. Pero, ¿cómo ha contribuido el sistema nervioso al éxito evolutivo animal? Es claro que el movimiento inteligente es requerido para sobrevivir, para procurar alimento y refugio, lo mismo que para evitar convertirse en el alimento de otros. El término "Inteligente" implica, como mínimo, una estrategia rudimentaria que se base en reglas tácticas, relacionadas con las propiedades del entorno en el cual se mueve el animal. De lo contrario, además de no tener sentido, el movimiento resultaría peligroso (moverse hacia el precipicio). Es absolutamente indispensable que los animales anticipen el resultado de sus movimientos con base en los sentidos. Para sobrevivir, los cambios en el entorno inmediato deben poder evocar un movimiento (o la ausencia de éste). La predicción de eventos futuros —vital para moverse eficientemente— es, sin duda, la función cerebral fundamental y más común.

Antes de proseguir, aclararemos el significado de "predicción", término que se refiere al pronóstico de algo específico que puede suceder. Todos los días predecimos cosas — como el ardor que sentimos al caminar descalzos sobre el pavimento caliente o el inevitable accidente si no se gira el automóvil al llegar al final de una calle. Al correr en un partido de tenis, es necesario predecir el momento y sitio adecuados en que la pelota se encuentre con la raqueta.

Consideremos dos carneros salvajes cuadrándose para la lucha. Mientras se miran el uno al otro, lentamente se yerguen sobre las patas traseras y buscan en el adversario señales mínimas que indiquen cuándo comenzará a desplazar su peso hacia delante, listo para la carga. Dado que una ventaja de tan sólo medio paso puede cambiar el resultado de la competencia, el carnero (o cualquier otro animal) debe anticipar el ataque para contraatacar, o sea, debe predecir el golpe antes de recibirlo.

La capacidad de predicción es claramente vital, de ella depende la vida misma del organismo. Sin embargo, los ejemplos anteriores no logran dar una idea general de la importancia de la predicción en el control cotidiano del movimiento corporal. Consideremos el simple acto de sacar una botella de leche de la nevera. No es un acto que implique mayor reflexión, pero requiere predecir el peso de la botella, su textura resbalosa y, finalmente, calcular el equilibrio compensatorio mediante el cual el movimiento de la botella al vaso describa una trayectoria eficiente y armónica. A medida que recibimos información sensorial directa desde el exterior, ajustamos el movimiento y el equilibrio compensatorio requerido. Pero, incluso antes de coger la botella, ya habremos efectuado una aproximación promotora de lo que ha de venir.

La capacidad del cerebro de predecir no se genera sólo al nivel conciente, ya que evolutivamente la predicción es una función. mucho más antigua que la conciencia. Consideremos lo siguiente:

¿Le ha ocurrido haber pestañeado cuando un insecto se ha acercado a su ojo? Usted no vio al mosquito, al menos no conscientemente, pero anticipó el evento y pestañeó para proteger el ojo. La predicción, parte medular de este mecanismo básico de protección, casi siempre opera tanto a niveles conscientes como reflejos, y es la más generalizada de las funciones cerebrales en la mayoría, sino en todos los niveles de su operación.

Al comienzo del presente libro mencioné que la mente, que puede representar o no la realidad externa, evolucionó para dirigir las interacciones de un organismo vivo con su entorno, y que la anticipación amplifica notablemente el éxito de los sistemas móviles. Pero además, y fundamentalmente, tal capacidad de predicción tiene que ser única (no se pueden predecir dos cosas opuestas al mismo tiempo). ¡No tendría sentido que la cabeza predijera una cosa y la cola otra! Las funciones de predicción deben estar centralizadas.

Lo predicción y el origen del "sí mismo"*

Aunque la predicción se localiza en el cerebro, no se lleva a cabo en un lugar especial. Las funciones anticipatorias deben congregarse bajo un único marco de referencia o modelo; de lo contrario, podrían estar localizadas en diversos órganos, pero no funcionarían de modo armónico. ¿Cómo se conglomeran estas funciones? ¿Dónde se almacena la función anticipatoria? Yo creo que la respuesta se encuentra en aquello que hemos dado en llamar el "sí mismo".

*Por “sí mismo” se entiende "self", frecuentemente traducido al español (incorrectamente) como "el yo". En ingles se enfatiza la diferencia entre el “I" (el sujeto) y el “self” (el objeto); este ultimo es el yo reflexivo. El "yo" es la autoconstrucción de la persona en la conciencia de si mismo. (Nota de F.J.Á.L.)

El "sí mismo" es la centralización de la predicción, y no nace del dominio de la autoconsciencia, pues ésta sólo se genera al darse cuenta de sí mismo. Según esto, el sí mismo puede existir sin conocimiento de la propia existencia. Aun en nosotros, los humanos, como individuos autoconscientes, la autoconsciencia no está siempre presente. Ante un reto difícil como nadar para escapar de un tiburón, se intentará alcanzar la orilla y se estara muy consciente de lo que sucede, pero no de sí mismo; nadie pensará: "Aquí me encuentro yo, escapando del tiburón". La persona pensará en tales términos sólo al alcanzar la orilla.

En capítulos posteriores se discutirá la autoconsciencia, pero deseo señalar desde ahora el problema del sí mismo. Entendiendo que el cerebro predice basándose en una "entidad" inventada, el "sí mismo", comprenderemos de inmediato cómo se genera el estado mental.

Resulta claro por qué emergió esta habilidad anticipatoria: es crítica para la supervivencia y constituye una directriz tanto para el animal singular (momento a momento) como para su especie. ¿Cómo emergió evolutivamente la habilidad de predecir? La respuesta puede encontrarse con un poco de reflexión. Pero antes debemos entender cómo el sistema nervioso efectúa actualmente la predicción; una vez que lo sepamos, encontraremos la manera como la naturaleza desarrolló esta sorprendente función.

Más adelante veremos que el sistema nervioso anticipa mediante una rápida comparación entre las propiedades del mundo externo, transmitidas por los sentidos y su representación interna sensomotora. Para que la predicción resulte útil, el sistema nervioso debe generar una solución promotora en lo relacionado con los movimientos efectuados sincrónicamente. Cuando un patrón de actividad neuronal adquiere significado interno, el cerebro genera estrategias para proseguir, es decir, para emitir otro patrón de actividad neuronal. Tal estrategia es una representación interna de lo que va a suceder. Los patrones premotores neuronales que resultan de la estrategia se transformarán entonces en la actividad neuronal motora que genera los movimientos corporales adecuados. Estas transformaciones requieren una representación interna de lo que está por venir, para actualizarse con el contexto del mundo externo (figura 2.1).

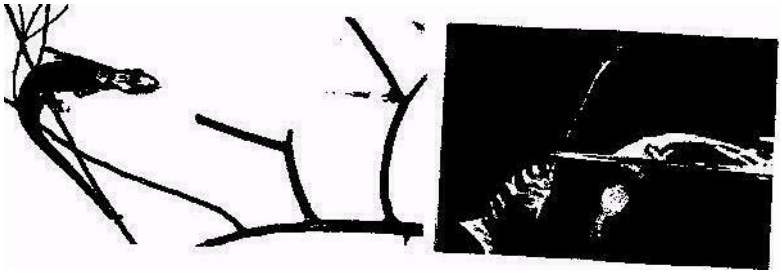


Figura 2.1

Dos ejemplos de la capacidad de los animales para planear la ejecución motora mediante la predicción de eventos futuros. (A la izquierda) Un camaleón en la fase intermedia de extensión y retiro de la punta pegajosa de la lengua pora capturar un insecto. ¡Derecha! Pez arquero de los Indias Occidentales, así llamado porque dispara, rápida y precisamente, gotas de agua pora aturdir y capturar insectos o arañas cerca de lo superficie del agua. (Fotografías por cortesía de la New York Zooiogical Society. Adaptado de Romer, 1969, pp. 68 y 167.)

Predecir ahorra tiempo y esfuerzo. La predicción es crucial para que el cerebro genere un movimiento activo, no sólo orientado hacia una mera, sino también como función básica de ahorro de tiempo y energía. Esto es un tanto extraño, pues siendo el sistema nervioso, y en particular el humano, el procesador más refinado y capaz de cuantos conocemos, se esperaría que estuviese por encima de tan triviales consideraciones. Sin embargo, y aunque no lo parezca, en lo que a tiempo se refiere, la actividad cerebral no es paralela a la realidad, en el sentido de que el cerebro procesa la información de manera discontinua, pero la realidad, como el tiempo, son continuos. No es posible recibir toda la información sensorial del exterior y a la vez tomar decisiones rápidas y correctas. Las neuronas son rápidas, pero no tanto. Nótese que hasta ahora estoy hablando sólo de la fase premotora del procesamiento y que las interacciones eficientes con el mundo externo requieren, así mismo, que tras tomar decisiones en el momento adecuado, el cerebro las efectúe mediante el movimiento.

El cerebro divide la información e implementa su atención con base en su importancia, de modo que, sin sobrecargarse, tome decisiones momentáneas. Para sincronizarse con lo que sucede en, el exterior en un momento dado, el cerebro debe darse suficiente tiempo para efectuar las decisiones motoras y poder cambiar rápidamente de una decisión a la otra. En Otras palabras, el cerebro no puede detenerse haciendo una cosa cuando debe pasar a la siguiente. Este modo operativo se deriva de la llamada función anticipatoria, propiedad ésta que es inherente a los circuitos neuronales. De hecho, el nivel de origen de la predicción se encuentra en las neuronas mismas y, como ejemplo, consideraremos el control del movimiento.

La predicción y el control del movimiento

La capacidad predictiva del cerebro se comprende a la luz del análisis de las estrategias de control motor, puesto que ambas funciones evolucionaron conjuntamente. Volvamos a la nevera de donde íbamos a tomar la botella de leche. Los movimientos adecuados para esto requieren que se especifique el patrón de contracción de la secuencia extensión/prensión, además del uso correcto de los músculos posturales mientras el individuo se inclina para alargar el brazo. Para impulsar esta sencilla secuencia motora, el cerebro debe hacer varias cosas. Cada músculo suministra una dirección de tensión (un vector) y, a su vez, cada vector muscular se compone de fibras musculares individuales que actúan en grupos preestablecidos según la inervación común que tenga cada grupo con su moto-neurona propia. Esto se conoce como "la unidad motora", en la cual cada motoneurona inerva decenas o cientos de Fibras musculares, pero cada fibra muscular solamente acepta órdenes de una motoneurona (cada motoneurona tiene su rebaño de fibras musculares). Un músculo dado puede componerse de cientos de tales unidades motoras y

de miles de fibras musculares. El número de músculos multiplicado por el número de unidades motoras de cada músculo nos da el número total de grados de libertad para un movimiento determinado. El movimiento de alargar el brazo hacia la nevera parece simple (comparado, por ejemplo, con un buen servicio en tenis). Sin embargo, fúncionalmente hablando, incluso un movimiento simple involucra a la mayoría de los músculos del cuerpo, lo cual resulta en un número astronómico de posibles contracciones musculares simultáneas o secuenciales, así como de grados de libertad. En el ejemplo de la nevera, el brazo puede llegar a la botella partiendo de un número indeterminado de posiciones iniciales (si el individuo se inclina para ver la botella y tiene que alcanzarla desde una posición forzada y atípica).

Toda esta complejidad está presente antes de que el brazo y el cuerpo eleven la botella, cuando aún no se ha llegado a ella, de modo que antes de levantarla es necesario suponer su peso para planear el movimiento.

Al descomponer este movimiento e intentar comprender cómo lo procesa el cerebro, vemos que no es tan sencillo. Sin embargo, la magnitud del problema del control motor no deriva únicamente del número de músculos involucrados o de grados y ángulos de tensión u otras consideraciones. La dimensión real del problema radica en la compleja interacción entre las posibles direcciones de la tensión muscular y en su secuencia temporal de activación.

Buena parte del control motor ocurre en tiempo real o, dicho en otros términos, "al vuelo" (on line, o como dicen en la televisión, "en vivo y en directo") y rara vez en condiciones carentes de estímulos. Consideremos las siguientes situaciones: bajar corriendo por un sendero inclinado y tortuoso; conducir un automóvil con una taza de café en la mano; saltar y estirarse para devolver un servicio de tenis. La combinación de músculos que el sujeto activa en un momento dado en una secuencia de movimientos se efectúa en respuesta a estímulos teleceptivos (estímulos generados a cierta distancia que se procesan en su mayoría mediante los sentidos de audición y visión), a la retroalimentación cinética (sensación de movimiento del propio cuerpo) o en respuesta al pensamiento.

En general, dentro de sus posibilidades, el movimiento producido por un controlador cerebral óptimo debería ser altamente armónico. Es decir, un control continuo de las señales que efectúen los movimientos a una velocidad de corrección igual o superior a un ciclo por milisegundo. De este modo se minimizarían las distorsiones aceleradoras producidas por las sacudidas motoras. Lo anterior parece correcto, pero debemos preguntarnos si el cerebro es capaz de controlar el movimiento de esta manera continua, y "al vuelo".

Dado que aproximadamente 50 músculos de la mano, el brazo y el hombro son fundamentales para alcanzar la botella de leche, habría más de 10^{15} posibles combinaciones de contracciones musculares, número éste absolutamente asombroso, por decir lo menos. Si, tras evaluar todas las posibilidades, milisegundo por milisegundo, se opta por la mejor de ellas, entonces deberían tomarse 10^{18} decisiones por segundo. Si el cerebro fuera un computador, necesitaría de un procesador de un exahertzio (un millón de gigahertzios) para elegir las combinaciones musculares correctas. Pero esa cuenta es aun mas compleja (Welsh et al., 1995). La dimensión del problema se amplifica por muchos órdenes de magnitud cuando recordamos que cada músculo consiste de un mínimo de 100 unidades motoras y cada tensión muscular implicará diversas agrupaciones de ellas. Todo esto se refiere tan sólo al movimiento para alcanzar una botella de leche del refrigerador.

El cerebro no parece haber evolucionado para manejar ese tipo de control de movimiento, especialmente si se considera que éste contiene aproximadamente unas 10^{11} neuronas, de las cuales sólo una fracción se encuentra en el cerebelo, que es el área donde se procesa la mayor parte del control motor necesario para la secuencia motora discutida (Llinás y Simpson, 1981).

Una solución alterna para el control motor continuo consistiría en controlar cada músculo independientemente, a través del tiempo. Metafóricamente, el sistema motor podría considerarse como un banco de representaciones discretas (o de procesadores en paralelo, uno por cada músculo). Tal montaje aligeraría significativamente la carga funcional necesaria para controlar un músculo dado y minimizaría la generación de movimientos artificiales o infrecuentes, que

involucren sólo uno o dos músculos. Sin embargo, este modelo no podría controlar sinergias musculares complejas. Una sinergia muscular es un conjunto de músculos que, actuando al tiempo, generan un movimiento dado; tales sinergias operan, por ejemplo, en el "reflejo" de estiramiento, es decir, en la relación entre flexores y extensores (figura 2.2). Otro ejemplo de sinergia muscular sería la secuencia de movimientos para alcanzar la botella de leche o el movimiento subsiguiente de la mano al tomarla. Mientras más músculos intervengan en una secuencia motora, mayor será la necesidad de un elemento sincronizador preciso, que garantice la sincronía permanente de las respuestas musculares.

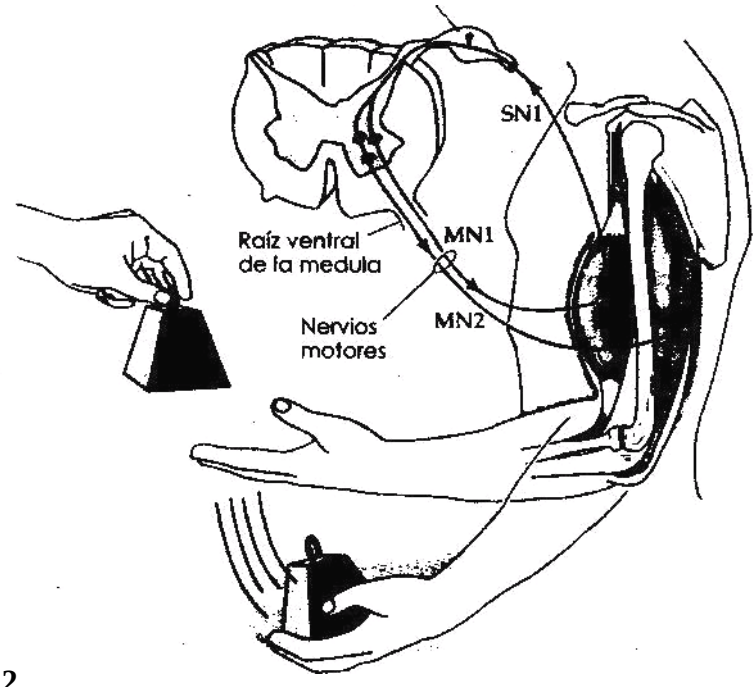


Figura 2.2

Ejemplo de circuito del reflejo de estiramienlo. Al colocar un peso en lo mano, el receptor de estiramiento del músculo flexor del bíceps envo una señal a la medula espinal, que desencadena la activación de dicho músculo y la Inhibición del antagonista extensor, el tríceps, con lo que (a posición del brazo se mantiene o se recupero después de colocar el peso. Todo el circuito reflejo se genera en la medula espinal. (Tomado de Rosenzweig et al. 1999, figura 11,10.)

La solución anterior se adapta mejor a un computador digital que a un sistema nervioso, ya que, a diferencia de los componentes del computador, las neuronas son analógicas: tienen propiedades de respuesta no lineales y no disparan sus potenciales de acción con la suficiente precisión temporal como para controlar permanentemente el procesamiento en paralelo.

Es obvio que el control continuo del movimiento exige una altísima sobrecarga de cómputo, independientemente de que el control se efectúe regulando la actividad de cada músculo de manera discreta y paralela, o escogiendo e implementando combinaciones de músculos. Sobra decir que nuestros movimientos, incluso los que parecen muy sencillos, son muy complejos. Profundizando en este problema, preguntemos lo siguiente:

1. ¿Cómo reducir la magnitud del problema del control motor, esa increíble sobrecarga funcional del cerebro, sin degradar significativamente la calidad de las secuencias motoras?

2. ¿Qué aspectos ya conocidos de la función cerebral aportan información para su solución?

La naturaleza discontinua del movimiento

Una manera sencilla de reducir la magnitud del problema del control del movimiento sería disminuir la resolución temporal del sistema de control, o sea, no optar por control continuo y en línea (al vuelo). Esta solución fracciona de inmediato la tarea del control temporal en una serie de problemas más pequeños. El control no tiene que ser continuo y ocurrirá a intervalos discretos de tiempo "dt" (literalmente, intervalos discretos de tiempo).

Esto es sumamente importante y conlleva la siguiente consecuencia: un sistema pulsátil no controla los movimientos de modo continuo, sino que lo hace de manera intermitente, generando contracciones musculares agrupadas, de pequeños saltos u ondulaciones. Este punto es esencial porque nos explica que el sistema nervioso controla el movimiento ¡titubeando! La motricidad es un temblor controlado. Los fisiólogos del movimiento saben esto desde hace más de un siglo: los movimientos no se efectúan de modo continuo, su naturaleza es discontinua. Ya en 1886, E. A. Schafer lo había propuesto:

La gráfica de la contracción muscular voluntaria... invariablemente rnuestra, tanto en el inicio como durante la contracción, una serie de ondulaciones que suceden una iras otra con regularidad casi exacta, que sólo puede interpretarse como la respuesta muscular rítmica al estímulo voluntario que provoca, la contracción... Las ondulaciones ... son fácilmente observables y su magnitud y sucesión son lo suficientemente regulares como para no dejar duda en una persona que haya visto una gráfica de una contracción tetánica (o tétanos), que es siempre producida por una excitación de 10 veces por segundo.

Una contracción tetánica (o tétanos) es la máxima fuerza que un músculo puede generar cuando se activa a alta frecuencia. Schafer observó que el ritmo de la contracción muscular voluntaria era claramente de unos 8 -12 Hz. Tras su informe inicial, el fenómeno de la periodicidad de 8 -12 Hz del movimiento voluntario, también llamado "temblor fisiológico", se convirtió en tema de intensa investigación. En 1894, Harris midió la frecuencia de la "tetania voluntaria". Esta se refiere literalmente a la máxima velocidad rítmica a la que se puede mover voluntariamente un músculo o sinergia muscular (incluyendo músculos del brazo, mano, dedos y lengua), como cuando se flexiona y extiende un dedo lo más rápidamente posible, o la máxima velocidad a la que se puede balancear voluntariamente el pie. Harris comprobó tal temblor a 8 - 12 Hz en todos los músculos estudiados.

Este investigador pasó entonces a plantear que "la velocidad promedio de las sacudidas musculares aisladas es de 10 a 11 por segundo, velocidad suficientemente próxima a la de la tetania voluntaria como para identificarse con ésta". Básicamente lo que se observa en el músculo aislado se refleja también en la generación voluntaria de un movimiento. En 1910, Sherrington señaló que el scherzo del Cuarteto para Piano No. 8 de Schubert requiere movimientos repetitivos de mano y de dedos de aproximadamente 8 Hz, cifra ésta próxima al máximo logrado por pianistas profesionales. También observó que la silaba "la" no puede repetirse más de 11 veces por segundo, por lo que planteó que "el límite prefijado de la frecuencia repetitiva de un mismo movimiento parece ser de 11 por segundo".

Algunos años después, Travís (1929) demostró que si un movimiento voluntario se inicia en posición de prensión, casi siempre comienza en fase con el temblor fisiológico. Informó que "el movimiento voluntario casi siempre es la prolongación del temblor… no interrumpe su ritmo y encaja en la melodía cinética" determinada por el cerebro. Posteriormente sugirió que la máxima velocidad de movimientos repetitivos voluntarios no podía exceder la velocidad del temblor fisiológico. En anos más recientes el estudio de! temblor fisiológico reveló la estrecha relación entre la discontinuidad rítmica de unos 10 Hz y el inicio propiamente dicho del movimiento. En 1956, con el trabajo de Travis ya bien avanzado, Marshall y Walsh demostraron que la ejecución real de los movimientos del ser humano realmente sí comienza en fase con el temblor fisiológico y corresponde a la dirección proyectada del movimiento.

Estos investigadores señalaron además que las discontinuidades fisiológicas del

movimiento voluntario eran independientes de su velocidad y de la carga impuesta sobre la extremidad. En esencia, aunque la velocidad máxima del movimiento voluntario no puede superar la del temblor fisiológico del músculo, el ritmo del temblor persiste con una periodicidad constante, independientemente de la velocidad del movimiento realizado o de que se ejerza o no alguna fuerza sobre el músculo. En los últimos 15 años, se ha establecido definitivamente que el ritmo de 8 -12 Hz del temblor fisiológico no sólo se observa durante el movimiento voluntario sino también, y tal vez con mayor intensidad, al mantener determinada posición, o cuando los miembros se hallan en reposo o apoyados (Marsden et al., 1984).

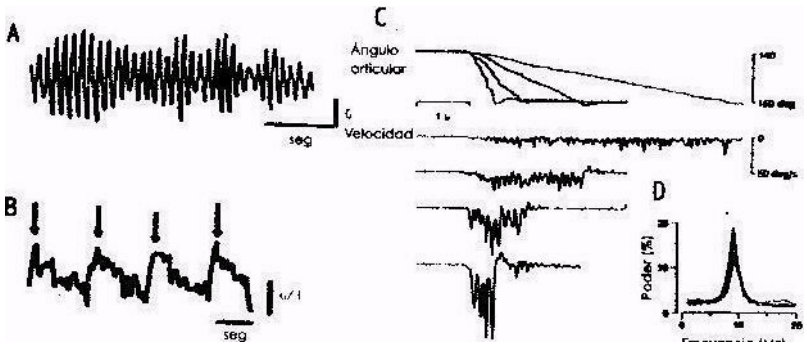


Figura 2.3

Ejemplos de temblor. (A, B) Registro de flexión y extensión de la muñeca en un adulto normal que muestra un ritmo de 10Hz (Schäfer. 1886). (C) Muestras de registros en los que se observan rompas voluntarios a diferentes velocidades de ejecución. Los registros superiores de (A) muestran el desplazamiento angular y los registros inferiores, las respectivas velocidades angulares. Las velocidades fueron de 4, 10, 25 y 62 grados/segundo. (D) Espectros de potencia de 160 registros del mismo sujeto en cuatro velocidades idénticos. La amplitud del espectro se encuentra claramente entre 8 -10 Hz. (Tomado de Vallbo y Wessberg. 1993, figura 4, o, 680)

Más recientemente, Wessberg, Vallbo y sus colegas (1995; Vallbo y Wessberg, 1993; Wicklund, Fernstrom et al., 1999) encontraron importantes intermitencias de 8 -10 Hz en los movimientos digitales lentos y "armónicos" (figura 2.3). Como no había consistencia temporal entre las latencias del reflejo de estiramiento que pudieran intervenir en este movimiento y las intermitencias motoras observadas, Wessberg y Vallbo (1995) sugirieron que probablemente el origen de tales discontinuidades debía buscarse en niveles cerebrales, por ende, superiores a la medula espinal. El reflejo de estiramiento es un mecanismo simple de retroalimemación negativa que involucra una fibra muscular y sus correspondientes circuitos segmentarios en la medula espinal y permite que, tras el estiramiento pasivo de un músculo, haya una contracción compensatoria subsiguiente. Basándose en el cálculo de su latencia (desde el estiramiento hasta la contracción), los autores concluyeron que dicho reflejo no explicaba el patrón temporal de actividad de los componentes del temblor del estudio anterior. Por tanto, Wessberg y Vallbo (1995) sugirieron que el impulso de tales componentes periódicos debe generarse en estructuras cerebrales superiores a la medula espinal.

Aun más, N. A. Bernstein se preguntó hace ya más de 30 años (1967): "¿Habrá razón para dudar que la frecuencia [del temblor] marque la aparición de las oscilaciones rítmicas en la excitabilidad, si no de todos, al menos de los principales elementos del... aparato motor, las cuales, por cierto, requieren una sincronización mutua basada en el ritmo?"

El movimiento no se caracteriza por ser tan armónico y continuo como nos lo hacen parecer los movimientos voluntarios; más bien, la ejecución motora consiste en una serie

intermitente de sacudidas cuya periodicidad es altamente regular. Además, el temblor fisiológico se observa incluso en reposo (cuando no hay movimiento activo) y se asocia estrechamente con el inicio y la dirección del movimiento. Por ejemplo, los movimientos hacia arriba se inician durante la fase ascendente del temblor fisiológico (Goodman y Nelson, 1983).

¿Qué representan estas discontinuidades rítmicas? ¿Qué significan funcional mente? Para comprender lo anterior, invoquemos el principio de la parsimonia (La Navaja de Occam[1]). Entonces, ¿cuál es la respuesta más sencilla que encaje con los datos?

1 Este principio, formulado en el siglo XIV por el franciscano inglés William of Occam, una de las glorias de la filosofía escolástica, plantea que las presunciones introducidas para explicar algo no deben ir más allá de lo necesario (nota del editor).

Quizás la explicación más parsimoniosa es la que tome en cuenta la sobrecarga increíblemente alta que el control del movimiento le impone al cerebro. El ejemplo anterior permite apreciar que estas discontinuidades rítmicas no corresponden a una propiedad de los músculos, sino que el temblor fisiológico reflejaría una orden pulsátil por parte del cerebro. Una organización pulsátil es ideal para un sistema de control discontinuo, ya que contribuye a disminuir la sobrecarga de cómputo. Pero si a cambio no se ganara nada, el control intermitente podría acarrear la desventaja de movimientos entrecortados y sin la certeza en la sincronización de grupos musculares durante determinado movimiento. Entonces, además de simplificar el trabajo del cerebro, ¿qué otra ventaja ofrecería un control pulsátil?

Unificación motora en el tiempo y centralización de la predicción

Un sistema de control pulsátil, al contrario de un sistema de comando continuo, puede preparar uniformemente a un grupo de motoneuronas independientes hacia un rango lineal de respuesta (Greene, 1972). Aclarando lo anterior, un control pulsátil serviría para poner en coherencia temporal a una población de neuronas independientes a fin de asegurar una respuesta uniforme. Esto es importante, porque las neuronas motoras reclutadas para efectuar la mayoría de los movimientos suelen hallarse en diferentes segmentos medulares, y tal mecanismo pulsátil serviría de marcapaso para sincronizar estas actividades neuromotoras.

Un sistema de control pulsátil también permitiría breves periodos de aceleración motora, a modo de mecanismo que combate la inercia producida por la fricción y la viscosidad de los músculos (Goodman y Celso, 1983). Por ejemplo, cuando empujamos en vaivén un automóvil enterrado en el barro, este tipo de movimiento nos ayuda a sacarlo.

Finalmente, un sistema periódico de control unificaría temporalmente las señales de entrada y de salida. En otras palabras, este tipo de control amplificaría, de modo global, la capacidad de integración que tienen las entradas sensoriales y las órdenes motoras descendentes.

¿En qué difieren entonces los sistemas de control de los de comando? Los primeros envían sólo las órdenes estrictamente necesarias (de tipo "haga y no pregunte") para que los elementos del sistema ejecuten un comando global (o sea que micromaneja). En cambio, los sistemas de comando imparten simultáneamente las mismas instrucciones globales a todos los elementos involucrados ("Háganlo, no interesa cómo"). Resulta obvio que estos sistemas deben trabajar coordinadamente; lo más parecido a la falta de coordinación es un sindicato sin trabajo; un proyecto bien definido pero sin orden laboral es un proyecto que no se hace. Excepto por la diferencia de marco temporal, en términos didácticos, la metáfora que mejor explica el funcionamiento cerebral es la de la división del trabajo, ya que el cerebro opera en el ámbito de los milisegundos, lo cual exige gran agilidad para reorganizar su foco de acción en un abrir y cerrar de ojos.

Centremos ahora la atención en el sistema de control, para pasar posteriormente al sistema de comando que, como ya se sabe, en últimas constituye el "sí mismo" (es decir, la centralización de la predicción).

Conceptualmente, ya se vio cómo la ritmicidad minimiza el trabajo del cerebro motor y se aclaró que la operación cerebral continua, "al vuelo", que se pensaba era la única manera de efectuar un movimiento armónico, no es factible fisiológicamente. Por el contrario, el cerebro delega la función de convocatoria de las tropas motoras a un sistema intermitente de control de la señal pulsátil, lo cual en el sistema musculoesquelético se refleja como temblor fisiológico. Además de ahorrarle al cerebro una enorme sobrecarga, el control pulsátil minimiza extraordinariamente los riesgos de operar discontinuamente en el tiempo. Recordemos las palabras de Bernsrein: "La sincronización mutua ejercida por el ritmo es sin duda necesaria" para el aparato motor como un todo.

Antes de profundizar en el problema de reducir la sobrecarga funcional del control motor, mencionaré otro punto. Hoy en día se sabe que, desde el punto de vista músculo-esquelético, el temblor fisiológico es el producto de una señal descendente (cuya naturaleza y origen discutiremos en breve). Sin embargo, durante los estadios tempranos de desarrollo, el temblor muscular no es sólo reflejo, sino que, de hecho, es una propiedad inherente al tejido muscular y exclusiva de él (Harris y Whiting, 1954). Esto se conoce como el período miogénico de la motricidad, que ocurre durante el desarrollo, antes de que las motoneuronas hayan establecido contacto con los músculos que posteriormente activarán. En el próximo capítulo veremos cómo este temblor se transfiere de los músculos a las motoneuronas que los inervan y posteriormente a las motoneuronas superiores, las cuales a su vez activan las motoneuronas y así sucesivamente, siempre en una dirección interiorizante hasta convenirse en un sistema de control y, en último término, en un sistema de comando. Una vez más, afirmaré lo dicho en un comienzo: lo que hemos dado en llamar pensamiento es la interiorización evolutiva del movimiento.

Las sinergias ahorran tiempo

Volvamos al problema de reducir la complejidad del control motor en el cerebro. Comprendimos que este sistema de control opera intermitentemente. ¿Resultaría de alguna utilidad que el cerebro controlara los músculos como colectivos discretos y no individualmente? Un colectivo muscular es un grupo de músculos que se activan simultáneamente — como los del movimiento de prensión de la botella de leche. Puede también considerarse como sinergia muscular la activación temporalmente organizada de un grupo de colectivos musculares, que es eficiente para un propósito, Con respecto a las sinergias, cabe anotar que la carga funcional se reducirá de manera espectacular si el cerebro controta colectivos o sinergias y no músculos individualmente. Esta reducción será proporcional al grado de activación simultánea de ciertos subgrupos de músculos durante un movimiento. El control de colectivos musculares y no de músculos aislados disminuye el número de grados de libertad y, por ende, la complejidad de dicho control.

Los primeros estudios sobre "reflejos complejos" contribuyeron a explicar que el cerebro controla el movimiento a colectivos musculares y no a músculos individuales. El reflejo vestíbulo-espinal, mecanismo automático de corrección de la posición del cuerpo al perder el equilibrio (¡cuando en una bicicleta, al querer girar incline el cuerpo!), ilustra lo anterior. Tales reflejos agrupan conjuntos de músculos que controlan diversas articulaciones. Estos músculos se controlan desde diferentes niveles espinales (Brooks, 1983). La ejecución estereotipada y simultánea (ejecutada por músculos claramente independientes) en estos reflejos hizo pensar a los primeros investigadores que su activación emanaba de un solo comando y que se controlaban como una sola entidad funcional. La idea implicaba que la ejecución de algunos movimientos complejos se basaría en un acople relativamente invariable de actividades musculares.

Sin embargo, la mayoría de los movimientos que efectuamos —o que somos capaces de efectuar— no se compone de este tipo de patrones de actividad muscular estereotipada y permanente, Además, hay muchas maneras de efectuar eficientemente la mayoría de los movimientos complejos voluntarios (por oposición a los llamados reflejos), las cuales involucran diferentes combinaciones de músculos. Por ejemplo, el lector podrá alcanzar la botella de leche

por la izquierda en una ocasión y por la derecha en la siguiente. Esto no invalida la premisa acerca de la necesidad de colectivos musculares para ahorrar tiempo y energía. Como las sinergias y los colectivos musculares son la base del movimiento, podemos examinar desde otra perspectiva la organización neuronal del control motor.

Como es de esperar, al efectuar un movimiento complejo se presentan cambios dinámicos en las combinaciones musculares. Si son los colectivos musculares y no los músculos individuales los que conforman las unidades por controlar, entonces ¿qué le exige esto al proceso central de control motor? Exige que durante un movimiento complejo el sistema de control pueda reconfigurarse dinámicamente, de modo que estos colectivos se ensamblen de manera transitoria, se disuelvan rápidamente y se reconfiguran según las demandas del momento. Como el sistema nervioso central dispone de muchas soluciones para una tarea motora, es lógico que cualquier sinergia funcional organizada por el cerebro sea una. estructura funcional, evanescente y transitoria. Desde el punco de vista del comportamiento, además, estas estructuras tampoco se reconocerán como patrones invariables de activación muscular, como sí sucede con la manifestación de reflejos estereotipados.

La hipótesis de un sistema "hipercompleto" de colectivos musculares garantizaría un enorme grado de versatilidad y flexibilidad en las elecciones por parte del sistema de control. La idea del sistema "hipercompleto" se aclara si se piensa en las diversas maneras de alcanzar la botella de leche. Si, de un grupo "hipercompleto" de sinergias funcionales equivalentes, el sistema de control motor selecciona algunas de las que realizan la tarea razonablemente bien; definitivamente se aliviaría la carga sobre el control motor y la demanda de precisión, puesto que ya no habría que elegir cada vez la sinergia correcta entre un número muy grande de posibilidades.

El doble paso

Según lo anterior, proponemos que los movimientos voluntarios rápidos tienen dos componentes operativos diferentes. El primero es un movimiento balístico (sin retroalimentación) que se aproxima a la finalidad del movimiento: —Acerque su mano a la botella de leche. En este período se utiliza información sensorial previa» de bucle abierto". En otras palabras, la información visual de la botella de leche (antes de alcanzarla) prealimenta el sistema premotor de control ayudándolo a escoger un movimiento apropiado de alcance. El segundo componente afina el movimiento y opera "en bucle cerrado", es decir que mediante claves táctiles, cinestésicas, vestibulares (de equilibrio) o visuales, modifica la ejecución de tal movimiento. La sintonización por parte del sistema de retroalimentación permite alterar la trayectoria del movimiento de alcance, si por ejemplo la mano se golpea contra el frasco de salsa de tomate; e igualmente, ya con la botella de leche en la mano, se hacen ajustes del movimiento según su peso o su textura. Por ello, el control por prealimentación también se denomina control predictivo, mientras que se dice que el de retroalimentación es reflejado.

Greene (1982) sugiere que la sinergia que subyace ai componente retroalimentador de los movimientos voluntarios complejos se selecciona según estimaciones que, si bien son aproximadas, no son iguales al punto final deseado. Según esto, la magnitud del ajuste motor por retroalimentación es inversamente proporcional a la precisión con la cual el elemento prealimeiitador se acerca a la meta final. Con la selección de una sinergia óptima para la tarea se reduce el esfuerzo posterior de corregir las desviaciones originadas por este componente retroalimentador. Sin embargo, si sólo hubiera una sinergia muscular que se aproximara al punto final deseado de un movimiento, seria necesario efectuar importantes correcciones de los errores de selección, con la correspondiente pérdida de tiempo y de coordinación del movimiento. Pero como ya dije, hay muchas sinergias que se aproximan al movimiento deseado, por lo cual ya no será necesario escoger con absoluta precisión tan solo una.

Si la selección se mantiene dentro del rango de la aproximación permitido, el precio pagado por la prealimentación se compensará con el mínimo esfuerzo posterior, impuesto por la

retroalimentación.

Finalmente, la magnitud del problema del control motor se reduce aun más si se descartan colectivos musculares irrelevantes o no adaptativos, lo cual impide que el número de selecciones sea demasiado alto (elimina la polución).

Las sinergias musculares irrelevantes obligan al sistema motor a efectuar un importante trabajo extra, puesto que restringen la modulación retroalimentadora, la cual permite que el movimiento llegue a su punto final. La selección de sinergias útiles implica un mecanismo motor innato de predisposición a escoger colectivos musculares significativos. En el capítulo 3, cuando veamos cómo, a través de la evolución, se obtuvo la habilidad cerebral para la predicción, nos percataremos de cómo la formación de colectivos musculares es fundamental para la supervivencia.

Resumen

Antes de profundizar sobre el control motor y su relación íntima con las propiedades anticipatorias del cerebro, resumamos lo explicado.

Hemos discutido dos razones fundamentales por las cuales el cerebro debe anticipar. En primer lugar, los animales que se mueven activamente deben anticipar para interactuar exitosamente con él exterior. En segundo lugar, la interacción motora exitosa debe ser inteligente y rápida, o de lo contrario moverse resultaría definitivamente peligroso.

En este ámbito es claro que la predicción se formula a partir de una imagen sensomotora — de una contextuaiización del mundo externo. El marco de referencia de la imagen interna, premotora de lo que va a suceder, se construye con base en las propiedades del mundo externo, según nos las transmiten los sentidos de audición, visión o tacto. El resultado de comparar el mundo forjado internamente con la información que llega del mundo externo genera órdenes para emprender una acción motora apropiada. Mediante este procedimiento se da una transferencia espectacular: la imagen interna de lo que ha de suceder "asciende" de nivel y adquiere realidad en el mundo externo.

También se vio que la predicción debe ser centralizada, de modo que las imágenes premotoras/sensomotoras basadas en las propiedades anticipatorias constituyan una estructura única. Éste es realmente el principio de que la unión cognoscitiva y los mecanismos neurales que la formulan son los mismos que generan, como una estructura única, la imagen sensomotora subconsciente que dice: "Cierre el ojo, que le va a entrar un mosco".

La segunda razón por la cual el cerebro debe operar por "predicción" es el ahorro de energía; la predicción simplifica la activación motora y reduce el consumo energético. Queda claro que aunque los movimientos parezcan suaves y continuos, no lo son. Son generados y controlados intermitentemente a través del tiempo, de manera pulsátil, mediante una función antícipaioria "dt". La característica de esta señal de control altamente periódica se manifiesta en los músculos, como el temblor fisiológico de 8-12 Hz durante el movimiento y el reposo. Como no siempre se halla on Une, esta señal premotora de control ahorra tiempo y la sobrecarga del controlador. Además, sincroniza todos los elementos del aparato motor, de suerte que éstos puedan recibir la señal de comando y efectuar, como una sola estructura unificada, determinado movimiento en el momento preciso.

Vimos, además, que en lugar de recurrir a músculos aislados, el cerebro ahorra tiempo utilizando colectivos musculares como unidades para controlar. Adicíonalmente, al comenzar un movimiento voluntario rápido se ahorra trabajo, si del conglomerado "hipercompleto" sólo se escogen algunas sinergias funcionales, lo cual minimiza el dispendioso control por retroalimentación. El sistema de control dispone de muchas sinergias funcionales que se aproximan razonablemente bien a la trayectoria de un movimiento dado. Esto ahorra tiempo, pues no obliga al sistema a escoger una sinergia funcional en particular. Finalmente, el sistema motor no conforma sino sinergias máximamente eficientes, lo cual reduce aun más la sobrecarga computacional.

De lo anterior emerge un hilo conductor. En el ejemplo del movimiento de la raqueta de

tenis, el devolver un servicio requiere destreza espacial y temporal, y vemos que la predicción por parte del cerebro requiere reorganizar su foco de atención de manera rápida y radical. En este caso el cerebro opera con base en "lo que importa hacer en este momento". En realidad no tiene otra opción, ya que ¡no le queda tiempo para nada más! Opera, pues, como un emulador, un generador de la experiencia consciente. Además, el cerebro debe reconstruir el mundo externo como una película o un sueño continuo, en permanente discurrir. Para ello debe anticipar o prever constantemente, operando y orientando su foco de manera discontinua, pero integrando todo lo anterior mediante una actividad en saltos, en intervalos discretos de tiempo. En otras palabras, la predicción impulsa la reorganización de foco de manera rápida y evanescente. Esto implica que la estrategia que utiliza el cerebro para convocar, utilizar y posteriormente disolver las sinergias es la misma que utiliza para generar la cognición: un cerebro que usara diferentes estrategias globales para mover el cuerpo y para conocer el mundo externo no emplearía una solución óptima. Para finalizar este capítulo intentaré aclarar este hecho que, a primera vista, parece desconcertante.

¿Cómo predicen los circuitos neuronales? Una perspectiva más detallada

Basándonos en lo aprendido, es hora de aumentar la magnificación de nuestro microscopio e investigar más de cerca dos puntos relacionados: cómo funciona nuestro sistema de control motor y cómo controla los movimientos de manera intermitente. Ello permitirá comprender la naturaleza y generación discontinua de la conciéncia. Pero antes, es necesario entender cómo un circuito neuronal puede llegar a predecir. Hace más de dos décadas, Andras Pellionisz y yo intentamos determinar cómo predicen los circuitos neuronales (Pellionisz y Llinás, 1979) y concluimos que lo hacen aprovechando las diferencias del comportamiento eléctrico de las células nerviosas. Como algunas neuronas son muy sensibles a los estímulos y otras lo son menos, la función anticipatoria "dt" podría implementarse con circuitos neuronales cuyo procesamiento fuera análogo a la función matemática conocida como las series de expansión de Taylor. Se trata de la misma "dt" ya discutida. En general, lo anterior significa que las neuronas muy sensibles tenderán a "adelantarse" o a anticipar un estímulo determinado, respondiendo a él antes de que éste se reformule en el cerebro. Estas neuronas "alarmistas" responden más a la velocidad de cambio de un estímulo que a su magnitud. Si responden al cambio en la velocidad del estímulo, implementan algo parecido a una diferenciación matemática: su velocidad de respuesta cambia más rápidamente

que los cambios del mundo externo.

En el mundo de los negocios, ya existen programas de computador que predicen fluctuaciones en el mercado de valores, haciendo algo semejante a lo que creemos que hacen estas neuronas altamente sensitivas que permiten que el cerebro anticipe. Tan pronto como el valor de las acciones comienza a caer a cierta velocidad, el programa genera una orden de venta, sin esperar a verificar lo que está sucediendo. Si la tendencia se revierte, entonces compra, Si diversos computadores están vigilando muchos valores del mercado y realizan esta operación muy rápidamente, entonces ganarán dinero. Responden, no al valor mismo, sino a la velocidad de cambio del valor. Pese a que el programa sólo permite ganar muy pequeños incrementos, éstos se suman y, lo que es más importante, con tal tipo de operación es difícil arruinarse. (Esto lo pueden hacer los bancos; para el individuo el problema es que cada transacción puede ser más costosa que lo que produce.)

Imaginemos muchos computadores en paralelo, y que cada uno está evaluando simultáneamente diferentes aspectos de algún evento externo. Algunos extrapolarán rápidamente, otros lo harán más lentamente y finalmente otros lo harán en tiempo real, lo cual resultará en que el evento se reconstruya antes de haber finalizado. Ésta es la (unción anticipatoria "dt", que es justamente lo que hacen los circuitos neuronales. Por ejemplo, cerramos el ojo antes de que el insecto entre en él, extrapolando que si lo dejamos abierto

a la velocidad estimada de aproximación, muy pronto el insecto entrara en él. Resultado:

los boxeadores constantemente esquivan golpes que no se mandaron.

Lo mismo sucede en tenis: la raqueta se desplaza a donde se extrapola que estará la pelota cuando la raqueta llegue allí, y no a donde se hallaba en el momento que se vio. El mismo mecanismo opera cuando se anticipa que algo se retrasara, como cuando uno comienza a frenar en el momento en que el automóvil de adelante disminuye la marcha. El futuro se planea extrapolando, según lo que se piensa que sucederá si las cosas continúan presentándose de cierta manera. Pero cuanto más lejano el futuro de la extrapolación, mayor la posibilidad de cometer errores.

Por sorprendente que parezca, un proceso anticipatorio "dt" como el de los circuitos neuronales no es una invención inteligente del cerebro para añadir rapidez o calidad a algo que, de todos modos, hace adecuadamente. En realidad, emerge de los ensayos de la selección natural en el proceso evolutivo, que permitió que el cerebro predijera para generar imágenes premotoras. Sólo así, el cerebro puede mantenerse al tanto de lo que debe hacer: emular la realidad tan rápida y eficientemente como sea posible, de manera evanescente que permita transacciones rápidas con el exterior.

Pero, ¿cómo puede el cerebro emular la realidad y cómo genera tal estado mental? Necesitamos saber con más detalle cómo genera y controla el movimiento. Recordemos la breve discusión del capítulo 1 respecto de las uniones electrotónicas entre neuronas y de la generación de los estados oscilatorios y resonantes; son conceptos fundamentales para comprender la organización pulsátil y sinérgica del movimiento.

El control discontinuo del movimiento: organización del sistema

En el capítulo 1 vimos el importante trabajo de Graham Brown, quien propuso que la organización de la actividad de la medula espinal motor era más autorreferencial que reflexológica. La perspectiva reflexológica aseveraba que la ejecución del movimiento inicialnienre es (y debe ser) impulsada por la señal sensoria! que llega del exterior. Brown, por el contrario, sugiere que inicialmente el movimiento se ejecuta Impulsado por circuitos centrales neuronales cuyas propiedades funcionales pueden generar los patrones apropiados de actividad para determinado movimiento organizado. Sí bien la información generada a partir del mundo externo puede provocar un movimiento organizado (o un comportamiento), esta perspectiva se considera autorreferencial, porque la verdadera génesis fisiológica del movimiento no necesita de información del exterior. Brown demostró que la entrada sensorial es necesaria para modular el movimiento, pero no para generarlo (figura 2.4). Estos conceptos se relacionan con dos componentes fundamentales del control del movimiento voluntario: la preaiimentación, por ser generada internamente, no requiere información sensorial, pero la retroatimenración, en cambio, si requiere una entrada sensorial de la periferia para sintonizar adecuadamente el movimiento voluntario.

Después del trabajo de Brown, quedaba el problema de dilucidar el mecanismo para tal autogénesis. Si no se trataba de una entrada reflejo/sensorial, ¿entonces qué era lo que permitía a tales circuitos centrales impulsar el movimiento organizado de manera intrínseca? Dar respuesta a estos problemas ha tomado tiempo, pero hoy ya reconocemos que tales propiedades radican en la oscilación neuronal intrínseca producida por las corrientes iónicas específicas (Llinás, 1988).

Es claro que el comportamiento neuronal oscilatorio se relaciona con la operación organizacional del aparato motor como un todo. Dicho comportamiento oscilatorio es la base de la generación de la actividad rítmica, como la marcha, el rascarse o los movimientos involuntarios del temblor fisiológico, o por lo menos se asocia con ella. En cuanto a la relación entre el temblor y la iniciación del movimiento voluntario, se concluyó que esta actividad

periódica muscular de 8-12 Hz refleja la operación pulsátil y discontinua de! sistema supraespinal de control motor. Además, he propuesto que este sistema sincroniza los elementos del aparato motor como un todo, facilitando así la combinación de diversas señales premotoras implicadas en un movimiento significativo (figura 2.5). Si se considera que las velocidades de

conducción (velocidad de la señal nerviosa) de diferentes vías neuronales motoras pueden variar, resulta sorprendente que este sistema de control opere de manera no continua. Fisiológicamente es imposible informar anticipadamente a diferentes elementos neuronales (relacionados con un movimiento) acerca de actividades generadas simultáneamente por otros agentes (neuronales) que también contribuyen al movimiento final. Por esta razón, el sistema de control necesita un reloj o aparato que mida el tiempo y que aumente la probabilidad de que cienos eventos se encuentren en el eje temporal. La característica de este reloj o marca paso es su comportamiento oscilatorio y periódico.

Figura 2.4

Ejemplo de patrón estéreotipado, autorreferencial. desencadenado en ausencia del estímulo externo apropiado. En un estanque, un cardenal alimenta a varios peces que nadan hacia la superficie en busca de alimento. El pájaro los alimentó durante varias semanas, porque, tal vez, su nido fue destruido. Al haber perdido sus polluelos, esta ave probablemente respondía inapropiadamenle a su instinto materno dominante consistente en que, ante estímulos semejantes a los de sus polluelos (pequeñas bocas abiertas), se desencadenaba un comportamiento innato estereotipado (llamado "patrón de acción fijo" o PAF: ver capítulo 7]. Este comportamiento es determinado genéticamente y tiene una compleja interacción con estímulos ambientales. El ecólogo holandés Niko Tinbergen fue uno de los primeros en estudiar tales comportamientos en vertebrados. [Tomado de N, Tinbergen Animal Behavior, New York: Time Inc., 1966.)

¿Dónde reside tal sistema de sincronización de las señales de control motor que permite efectuar el movimiento de manera organizada y expedita? Debe localizarse centralmente (no estará ubicado en tos músculos o en la medula espinal). Aunque la medula espinal es más que capaz de sostener un movimiento rítmico, ¡como es el caso de la conocida gallina decapitada!, no tiene modo de .organizar y generar un movimiento directo por sí misma. La especificación central del tiempo debe ser generada por un sistema oscilador (tipo diapasón) generado por un conjunto de neuronas (una o dos neuronas aquí y allá no son suficientes para sincronizar la ejecución organizada del movimiento). Además, este cronómetro debe relacionarse íntima y explícitamente con el movimiento en sí.

La oliva Inferior

Diversos grupos de neuronas centrales (núcleos), como el núcleo de la oliva inferior (01), desempeñan un papel fundamental en la temporalidad de la coordinación del movimiento. Se sabe que los axones de las neuronas de la OI se agrupan en haces de fibras nerviosas que se

dirigen a un centro nervioso llamado cerebelo (figura 2.6), el cual se localiza por detrás de la masa cerebral y es responsable de la coordinación motora. Las fibras de la oliva inferior terminan ramificándose y contactando las neuronas más importantes de la corteza cerebelar, llamadas células de Purkinje, que son las de mayor tamaño del sistema nervioso. Reciben las terminaciones de los axones de la OI, denominadas fibras trepadoras, las cuales, literalmente, trepan sobre las ramificaciones dendríricas (proyecciones que aumentan la superficie de contacto) de las células de Purkinje (figura 2.6) en relación una a una. Ya se mencionó que la mayor pane del proceso de control motor ocurre en el cerebelo y que las fibras trepadoras (unas de las más poderosas sinapsis de los vertebrados) desempeñan un papel importante en ese control (Eccles et al, 1966), ya que las células de Purkinje inhiben sus neuronas blanco (Ito 1984, p. 61). Si la OI o las fibras trepadoras se lesionan, se eliminan de manera inmediata, severa e irreversible numerosos aspectos de la coordinación temporal del movimiento. El papel de la OI en la sincronización temporal es tan importante, que animales con lesiones en este sistema tienen dificultad para el aprendizaje de nuevos comportamientos motores (Welsh et al. 1995; Welsh, 1998). Sin embargo, ello no significa que el cerebelo sea el centro del aprendizaje motor, como lo afirman algunos científicos contemporáneos.

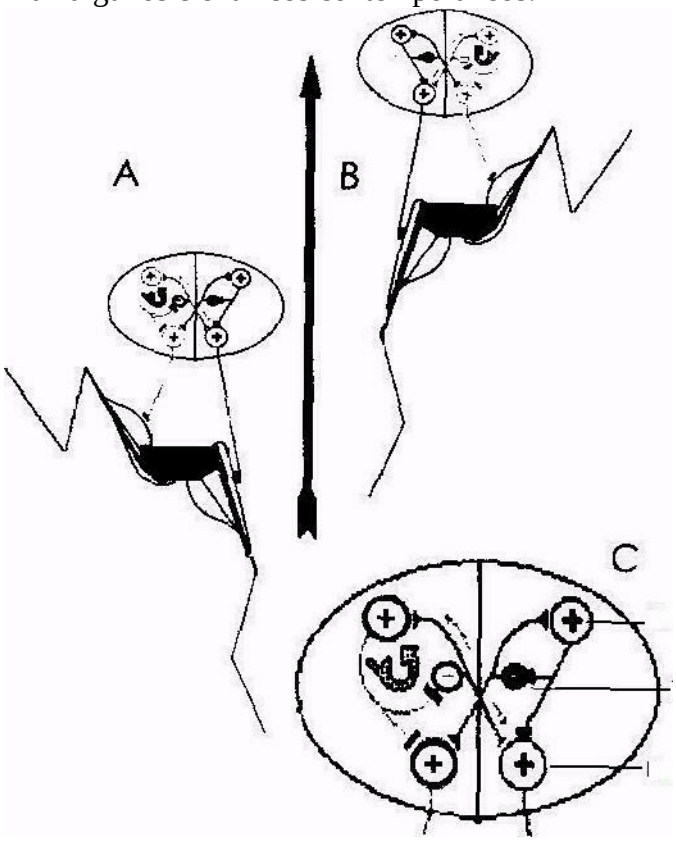


Figura 2.5

Hemí-centro apareado. El comportamiento estereotipado, oscilatorio, subyacente a movimientos dirigidos es impulsado por circuitos como los de la ilustración. La activación de la neurona motora que inerva el músculo flexor del miembro izquierdo se acompaña de la inhibición simultánea de su contraparte del miembro derecho, y viceversa. Esta activación/inhibición apareada se controla mediante un generador central de potrones que se origina en reglones superiores del neuroeje, (Dibujo de R. Llinás.)

El registro intracelular de las neuronas de la OI (ver capitulo 4) demuestran la existencia de oscilaciones espontáneas en su voltaje de membrana (de 8-12 Hz). Esta oscilación es subumbral (no es de suficiente amplitud como para que genere potenciales de acción en cada oscilación) pero modula los potenciales de acción (espigas) a una frecuencia de 1 -2 Hz (espigas por segundo) (Llinás, 1981). Es decir, aunque las células de la OI no disparan en cada oscilación, cuando lo hacen, los disparos se dan en el ápice de la onda subumbral.

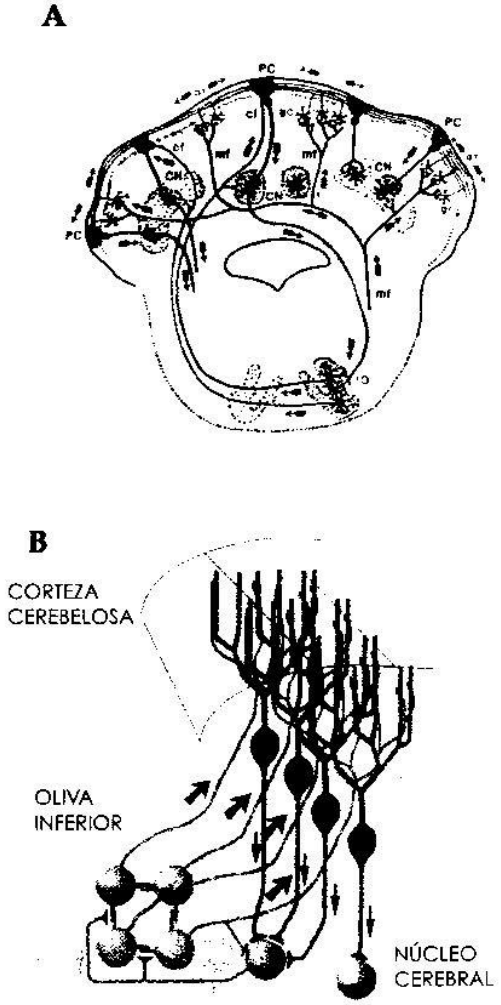


Figura 2.6

(A) Diagrama de los circuitos de las conexiones entre la oliva inferior (OI), la corteza cerebelosa y los núcleos cerebelosos (NC). (Modificado de Llinás, 1987. figura 23.5). (B) Detalle del bucle OI-cerebelo-NC. Los axones de la fibra trepadora de la OI terminan en la célula de Purkinje, en tanto que los axones de la célula de Purkinje se proyectan y terminan en los NC. Los axones de las células de los NC se proyectan a la OI, en dirección opuesta. (Modificado de Llinas y Welsh. 1993. figura 1.)

Hoy se sabe que las células de la OI disparan sus potenciales de acción rítmicamente y también se sabe acerca del complejo interjuego de conductancias de membrana (flujo iónico), subyacentes a la generación de la actividad oscilatoria. Esta actividad rítmica recibe el nombre de disparos autogenerativos, ya que tales células pueden generar potenciales de acción sin que medie una entrada excitatoria que converja sobre ellas (Llinás y Yarom, 1981a, b).

Consideremos entonces que en el núcleo de la OI las neuronas generan un patrón de actividad rítmica sincronizada. Esta actividad llega a las células de Purkinje de la corteza cerebelosa mediante las fibras trepadoras, así como a las células de los núcleos cerebelosos que manejan el movimiento (ver figura 2.6). En este caso, el cerebelo nos acerca fisiológicamente hablando al origen de la mencionada señal de tiempo que controla el movimiento. De hecho, la

actividad oscilatoria de la oliva inferior origina lo que llamamos el temblor fisiológico (Llinás et al, 1975) que sincroniza los movimientos. De hecho es pertinente aquí un eco adicional de las palabras de Bernstein: "¿Habrá alguna razón para dudar que la frecuencia [del temblor] marque la aparición de las oscilaciones rítmicas en la excitabilidad, si no de todos, al menos de los principales elementos de! aparato motor que, sin duda, requiere una sincronización mutua basada en el ritmo?" (Bernstein, 1967).

Pero aun así ¿si se puede asegurar que el temblor fisiológico refleje el mecanismo central de control de tiempo?

El recuadro 2.1 ofrece una evidencia científica contundente en favor de la relación de la OI con el temblor. Cabe preguntarse si durante e! movimiento voluntario la actividad de la OI es rítmica. Sabemos que el inicio de tales movimientos se asocia íntimamente con la fase del temblor. En un estudio con microelectrodos múltiples y simultáneos de registro de la actividad de las células de Purkinje durante protrusiones pulsátiles de la lengua en ratas móviles y no anestesiadas, Welsh (1998) demostró un patrón claro e intenso de actividad en la OI. Estos hallazgos, demasiado complejos para detallar aquí, apoyan seriamente la idea de una relación entre la organización pulsátil del movimiento y la actividad rítmica global de la OI (Smith, 1998; Welsh, 1998).

Recuadro 2.1
Harmalina

La aplicación directa del agente farmacológico llamado harmalina en la OI, amplifica las oscilaciones del potencial de membrana de las neuronas de la OI, produciendo una poderosa descarga sincrónica de 10 Hz. La harmalina aplicada sistémáticamente induce una activación generalizada y rítmica de todos los músculos del cuerpo lo que, desde el punto de vista del comportamiento, se manifiesta en un pronunciado temblor altamente estereotipado de 10 Hz (Villablanca y Riobo 1970; Lamarre et al., 1971; de Montigny y Lamarre, 1973). Además, con registros intracelulares, se mostró que la actividad repetitiva y altamente rítmica de las células olivares, reflejada a nivel de las células de Purkinje, estaba acoplado íntimamente al temblor de 10 Hz y permanecía así en registros a largo plazo (figura 2-7) (Llinás y VoIkind, 1973; Llinás, 1981). El temblor se elimina tras la ablación experimental de la OI, independientemente de la presencia de harmalina (Llinás et al., 1975).

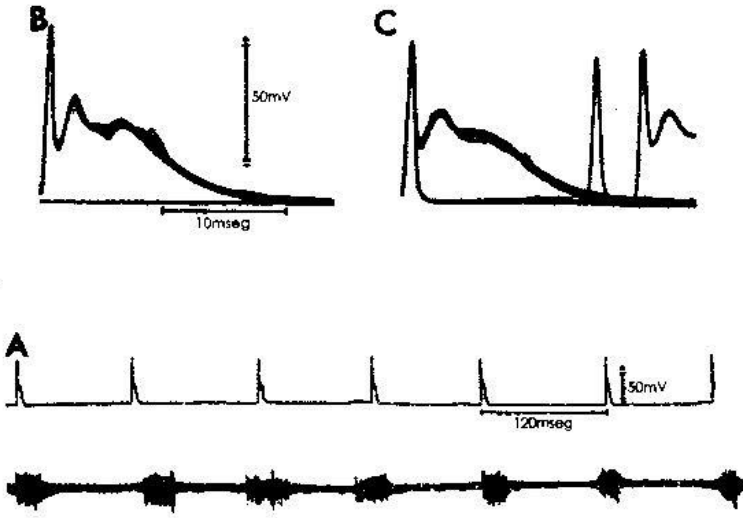


Figura 2.7

La aplicación de harmalina, sistémica o localmente, induce a la OI a generar descargas de 10 Hz. Ver texto para detalles.

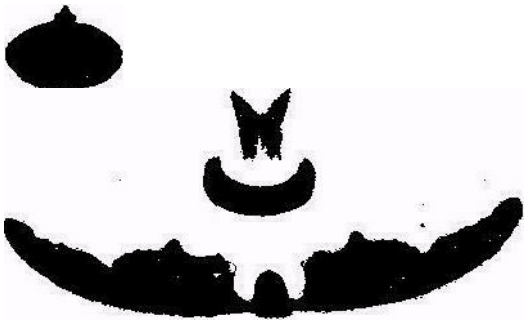
Acerca del control motor: principios e ideas

Hemos tratado en cierta extensión el problema del control motor, alejándonos aparentemente del objetivo de nuestra expedición, que es saber cómo emergió la mente durante la evolución, pero, de hecho, nos hemos acercado considerablemente al problema. Recapitulemos lo aprendido sobre el control cerebral del movimiento, pues estas ideas y principios nos serán necesarios a medida que profundicemos en la infraestructura evolutiva/fisiológica de la mente. El control cerebral del movimiento organizado dio origen a la generación y naturaleza de la mente.

Heurísticamente, el proceso de optimización/simplificación del sistema motor resultó en el control discontinuo que, como veremos, también opera en la esfera cognitiva. Este control, necesariamente pulsátil, debe operar con la suficiente frecuencia como para minimizar las distorsiones aceleradoras y suavizar así las sacudidas motoras. Finalmente, debe ser lábil para que pueda reconfigurarse rápidamente y llegar a una capacidad casi infinita de apropiación de combinaciones basadas en necesidades momentáneas y en recombinaciones de sinergias musculares. El sistema de control debería reflejar que tas configuraciones musculares que generan secuencias de movimientos voluntarios son altamente transitorias en la medida en que se reclutan y se descartan.

La evidencia fisiológica apoya sólida y convincentemente al sistema olivocerebeloso como candidato principal para conformar un conjunto neuronal capaz de optimizar y simplificar el control motor: temporalmente es pulsátil y espacialmente puede reorganizarse rápida y dinámicamente.

Así, la predicción es posible cuando se pueden calcular segmentos de tiempo bien definidos, de modo que se empleen (o controlen) adecuadamente. Un movimiento oscilatorio "bien comportado" se controla bien porque se genera en intervalos cortos. Si hay dudas respecto de un movimiento, se invierte lo mínimo en él, y esto es lo que llamamos un movimiento cauto o tentativo, aunque esta estrategia no siempre garantiza éxito. Un boxeador puede dar un puñetazo en 100 milisegundos y si el otro no lo ve llegar, no podrá esquivarlo (en este caso, no valen movimientos tentativos de evasión). Entonces ¿qué significa este "verlo llegar"? Sí el hombro se está moviendo hacia delante, tiene que saber que probablemente el puñetazo llegará en 200 milisegundos. El boxeo requiere que la predicción y la ejecución sean rápidas, lo que recuerda el juego en el mercado de valores. Ambos ilustran claramente que la predicción se basa en la información de llegada y en que la ejecución neuronal coordinada necesita que la actividad de esas neuronas sea coherente en el tiempo. Todo lo anterior es importante, incluso al alcanzar la botella de leche en la nevera. Lo sabemos, porque con frecuencia juzgamos mal su peso y la golpeamos contra la rejilla de arriba!



Fotografia anamórfica de una mariposa con un cono catóptico, C-1848, Science Museum/Science & Socrely Picture Libraty, Londres."

3

LA INTERIORIZACIÓN DE LOS UNIVERSALES MEDIANTE LA INTERIORIZACIÓN DE LA MOTRICIDAD

Una síntesis de la mente

Es justo mencionar que la ciencia contemporánea se inclina más hacia el análisis que hacia la síntesis. La neurociencia no es una excepción a esta regla, ya que, en general, no trasciende a la descripción objetiva de las propiedades de las neuronas o de las redes que éstas entretejen. A quienes creemos que el análisis de eventos desde el nivel molecular hasta el psicofísico requiere un contexto ; continuo y sin rupturas, nos resulta alentador el abordaje global de algunas áreas, particularmente en aquéllas que estudian los sistemas sensoriales.

En el sistema visual, por ejemplo, es generalmente aceptado que, por medio de la transformación de frentes de onda de luz en imágenes, las propiedades geométricas y refractivas del ojo comextualizan la organización del sistema visual en codos los niveles de la evolución. Esto es obvio si consideramos que en todos ellos la "tendencia evolutiva" es la transformación de las ondas luminosas en imágenes sobre la retina. La tendencia hacia una síntesis unificadora se refleja también en el estudio de otros sistemas sensoriales. Hoy en día se acepta que las propiedades resonantes de la membrana basilar del órgano coclear de Corti del oído interno (figura 3.1) y el arreglo espacial de los canales semicirculares del órgano vestibular constituyen los sistemas de coordenadas necesarios para la representación neuronal, del sonido y de la aceleración angular ,de la cabeza, respectivamente. Sin embargo, a medida que penetramos el sistema nervioso y nos alejamos de los órganos sensoriales periféricos, resulta más difícil mantener claridad respecto del contexto general en el cual se entretelen los diferentes niveles de análisis de la función cerebral. En este capítulo intentaré explicar, de modo contextual, la relación entre la capacidad cognoscitiva del cerebro y la historia natural de su evolución.

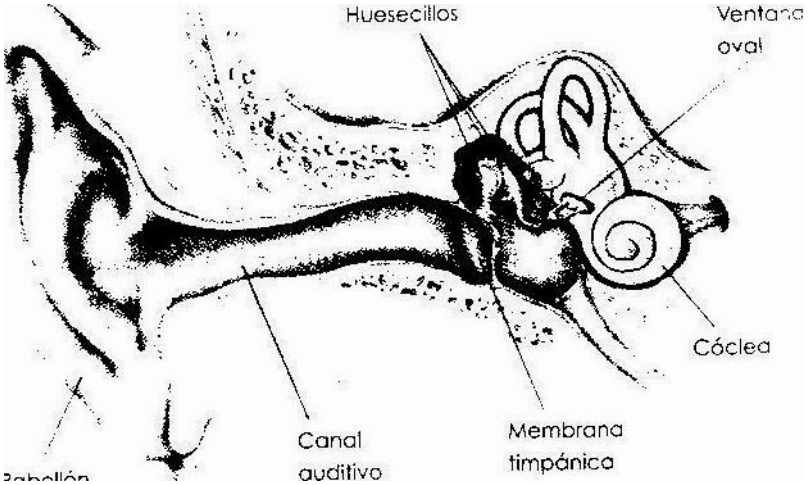


Figura 3.1

Diagrama del sistema auditivo que muestra el oído externo, medio e interno junto con el órgano coclear de Cortí, (Tomado de Bear et al.. 1996, fígura 11.3.)

En los capítulos 1 y 2 vimos que la capacidad anticipadora es indispensable para cualquier animal con movimiento activo, para lo cual se requiere un sistema nervioso central. Tales organismos deben tener una estrategia sólida para encarar las consecuencias de sus andanzas por un mundo gobernado por la sencilla pero implacable selección natural. Tal validación o comprensión del mundo externo se realiza mediante la yuxtaposición funcional de las imágenes

sensomotoras generadas internamente con las propiedades sensorialmente referidas del exterior, llamadas "universales". En el capítulo 2 se vio que las imágenes sensomotoras que emanan de las propiedades intrínsecas del cerebro son básicamente equivalentes a las que emplean las sinergias musculares para efectuar movimientos. Estas estructuras promotoras o patrones funcionales de actividad neuronal se conforman y disuelven fugazmente, ya que deben emular el rápido cambio de la realidad externa, a fin de determinar las consecuencias de los movimientos. Las propiedades del mundo externo o universales tienen que estar representadas de alguna manera en el funcionamiento del cerebro. Una de las características esenciales de la función cerebral es dicha interiorización, es decir, la integración de universales en un espado funcional interno.

¿Es posible describir en términos fisiológicos tales entidades complejas y transitorias? Por supuesto, y lo haremos en este capítulo, pero comencemos por entender algo de la geometría funcional del cerebro.

El cerebro en realidad no computa nada, al menos no en el sentido del manejo algorítmico de unos y ceros característico del "computador universal" de Alian Turing (Turing, 1947;Millican y CIark, 1996). Nuestro emulador de la realidad es fundamentalmente un requisito para la motricidad dirigida por imágenes anncipatorias internas de eventos futuros, que provocarán la correspondiente reacción o comportamiento en el organismo. Tales imágenes pueden considerarse como patrones premotores, especies de plataformas de planeamiento para comportamientos o acciones dirigidas pero, fundamentalmente, es de tales patrones premotores que emana la conciencia en todas las formas vivientes.

Como el cerebro no brotó un buen día de la nada, sino que es el producto de la evolución, debe tener el mismo orden genético á priori del resto del organismo. En principio, al nacer, todos los huesos, articulaciones y músculos, asi como gran parte de lo que pueden hacer, ya se hallan inscritos en la geometría del sistema. También desde el nacimiento poseemos la cualidad de la plasticidad, que es la habilidad para adaptarnos a las circunstancias cambiantes del mundo en el cual vivimos, mediante variaciones en los parámetros biológicos, precableados para ser maleables. El lenguaje humano es un buen ejemplo. Durante el desarrollo, perfeccionamos la habilidad de reconocer los fonemas inherentemente humanos de nuestra lengua materna y de descartar aquéllos que no escuchamos durante nuestros primeros años (Kuhl et al, 1997; Kuhl, 2000). Este proceso amplifica la habilidad para adquirir determinada lengua y no otra. Pero debe tenerse en mente que la plasticidad ocurre sólo dentro de límites claramente definidos. Como se vio en el capítulo 2, independientemente del entrenamiento o del esfuerzo personal, no es posible realizar movimientos mucho más rápidos que 10 Hz (Llinás, 1991). Otro ejemplo: con ejercicio específico es posible aumentar significativamente la masa muscular, pero no el número de fibras musculares individuales; sólo se puede alterar su masa y sólo dentro de ciertos límites. La misma regla se aplica al cerebro: la plasticidad y el aprendizaje permiten que la organización intrínseca de los sistemas nerviosos se enriquezca, pero sólo dentro de límites predeterminados.

Si las propiedades perceptivas del cerebro no se aprenden de novo, cabe preguntarse entonces ¿dónde y cómo se originan? Y la respuesta: definitivamente durante la evolución. El estudio del sistema visual del recién nacido permite observar en detalle las capacidades innatas de la función del sistema nervioso. En la mayoría de los animales, incluyendo los primates, desde el momento mismo en que la luz llega a la retina ya existe la capacidad de asignar significado a las imágenes visuales (Wiesel y Hubel, 1974; Sherk y Stryker. 1976; Ramachandran etál., 1977; Hubel y Wiesel, 1979). Lo anterior nos lleva al concepto del a priori neurológico, cuyo fundamento, desde luego, no es novedoso, sino que ha sido tema filosófico desde los días de Emmanuel Kant (Kant, 1781). La única diferencia es que, en virtud de lo que hoy sabemos sobre las propiedades funcionales de las células nerviosas y del cerebro, el problema del a priori neurológico pasó de ser sólo un planteamiento epistemológico a convertirse en un problema de tipo filogenético, evolutivo.

Antes de abordar el problema de cómo llegó el cerebro a utilizar representaciones anticipatorias para seleccionar e integrar un conjunto de transformaciones universales que representen el mundo externo, propongo que el cerebro es un sistema cerrado modulado por los

sentidos. Recordemos que un sistema abierto acepta las señales sensitivas nacidas del medio externo e independientemente de su complejidad, las procesa y las devuelve de manera refleja a ese mismo medio.

Según esta perspectiva, sería lógico pensar que, al nacer, el sistema nervioso central se encuentra en configuración de tabula rasa. De ser esto así, el cerebro sería fundamentalmente una máquina de aprender. Este punto de vista todavía goza de amplia aceptación, en particular en la rama de la ciencia conocida como redes neuronales. Ha dado un ímpetu descomunal a la industria electrónica, ya que los resultados prácticos son tangibles y ha contribuido de manera importante a la tecnología de control de sistemas. Sin embargo, aunque útil en otros campos, este abordaje explica muy poco acerca del funcionamiento real del sistema nervioso. Además, no explica la existencia de la invariabilidad funcional del sistema nervioso, incluso en diferentes especies. Al respecto, para la neurobiologÍa y la neurociencia, las semejanzas fenotípicas básicas (rasgos físicos observables) intra o interespecies se relacionan con funciones neuronales semejantes. Así, estas disciplinas suponen que el control de la estructura cerebral está determinada genéticamente — algo muy lejano de la idea de la tabula rasa.

Por otro lado, la hipótesis del sistema cerrado (Llinás, 1974, 1987) apoya la idea de un sistema eminentemente autoactivante, es decir, de una organización equipada para generar imágenes intrínsecas. En el capítulo 2 vimos que, dada la naturaleza del sistema tálamo-cortical, la entrada sensorial del mundo externo soló adquiere significado merced a la disposición funcional preexistente del cerebro en un momento dado, es decir, merced a su contexto interno. Lo anterior implica que tal sistema autoactivante puede emular la realidad (generar representaciones emuladoras, o sea, imágenes) incluso en ausencia de señales sensoriales, como ocurre en los sueños o en la fantasía (que discutiremos en capítulos posteriores). De esto se concluye algo muy importante: las propiedades funcionales intrínsecas representan el epicentro de la función cerebral, la cual es modificable (¡pero sólo hasta cierto punto!) por la experiencia sensorial y por los efectos de la actividad motora. En este último caso, el orden intrínseco cambia en respuesta al mundo externo, a imágenes generadas internamente o a conceptos. Vistas asi, las emociones constituyen excelente ejemplo de eventos intrínsecos generados internamente y, como tales, son patrones promotores primitivos. Tales patrones son evidentes en los vertebrados superiores, considerando que la supresión motora, que con frecuencia limita la manifestación de la emoción desde el punco de vista del comportamiento, también es parte del ámbito motor, como en: "¡Controle su cólera!". Estas cuestiones se tratarán en mayor detalle en el capítulo 8.

Volviendo a nuestra hipótesis: un sistema cerrado como e! sistema nervioso central debe haberse desarrollado durante la evolución como una red neurona! que, en un comienzo, manejaba relaciones de conectividad muy simples enere sistemas sensoriales y motores. A medida que el sistema nervioso evolucionó, las limitaciones impuestas por los sistemas de coordenadas que describen el cuerpo se integraron lentamente en su espacio funcional interno. Ello permitió que la criatura tuviera una comprensión natural de su propio cuerpo, que depende de la actividad, requisito obvio para el movimiento intencional (como el comportamiento de juego mostrado por la mayoría de los animales jóvenes, que en realidad es una exploración de las propiedades del espacio funcional interno). Además, tal como sucedió con la selección natural de ciertos aspectos del cuerpo, también se logró la integración gradual, genéticamente determinada, de sistemas de coordenadas dentro de un espacio funcional del sistema nervioso (Pellionisz y Llinás, 1982). Según un darwinismo directo, vemos que el a priori neurológico se desarrolló durante cientos de millones de años de filogenia en vertebrados e invertebrados, de donde se desprende el mensaje global de la primera sección de este libro: podemos considerar que la cognición no es sólo un estado funcional, sino una propiedad intrínseca del cerebro y un "a priori neurológico". La capacidad de conocer no necesita aprenderse; sólo debe aprenderse el contenido particular de la cognición en lo que se relaciona específicamente con aspectos particulares del ambiente.

Los sistemas se conforman a partir de la Integración de la motricidad individual de las células

Examinemos cómo llegó el cerebro a interiorizar las propiedades del mundo externo, cómo lo lleva a cabo y qué relación evolutiva existe entre este fenómeno y la generación de un espacio funcional tan asombroso como es la mente.

Comencemos con algunas generalidades acerca de cómo gestiona el cerebro las inmensas diferencias entre las propiedades del mundo externo y su representación neuronal. Por ejemplo, usted desea dibujar la cara de alguien conocido y tiene buena habilidad para el dibujo. Pensemos en los numerosos eventos cerebrales de entrada/salida implicados en esta tarea. Con movimientos delicados, es necesario reproducir —exteriorizar— la imagen interna de la persona, imagen formada por el cerebro a partir de llegadas sensoriales del exterior. ¿Qué tipo de espacio funcional le permite al cerebro construir y evaluar tal imagen interna, y posteriormente exteriorizarla? No es difícil comprender que una imagen interna sólo puede exteriorizarse mediante el movimiento: dibujar, hablar, gesticular con el rostro y las manos. Pongo énfasis aquí en que el cerebro comprende las cosas, sean éstas reales o abstractas, a través de manipulaciones del mundo externo, de nuestro movimiento y, por ende, a partir de la experiencia sensorial derivada de él. Basándome en los conceptos ya discutidos de acoples electrotónicos y oscilatorios, deseo formular una propuesta sobre cómo pudo ocurrir el proceso de interiorización, el "apropiarse" del mundo externo.

Un ejemplo preliminar adecuado: ¿Cómo evolucionó el corazón? Aunque no resulta obvia en un principio, la respuesta en realidad es muy sencilla. Evolucionó según el proceso de organización de la motricidad individual de cada célula, de la cual resultó la motricidad macroscópica. En términos mecánicos, ello implicó adicionar las propiedades de excitación/contracción individuales de cada célula, generando así un "sistema". La motricidad de cada célula se deriva de la activación de su maquinaria contráctil, que con frecuencia se modula rítmicamente mediante oscilaciones intrínsecas del voltaje de membrana de la célula debidas a las diferencias en concentración iónica entre la superficie interior y exterior de tal membrana. En experimentos de cultivos de células cardíacas individuales en cajas de Petri, se observa que cada célula tiene un latido propio (para revisiones, ver DeHaan y Sacks, 1972; Mitcheson et al, 1998). Al entrar en contacto unas con otras, estas células cardíacas se acoplan electrotónicamenie y asi comienzan a latir al unisono. En esta fase, se observan ondas de contracción impelidas y determinadas por la impedancia transcelular relacionada con el acoplamiento electrotónico. A medida que la superficie externa de este tejido celular se pliega sobre sí mismo y conforma compartimentos o cámaras cardiacas, la contractibilidad se distribuye diferencialmente en el espacio (isotrópica). Mas que ondas de contracción simples, la geometría agregada en forma de bolsa o cámara transforma estas contracciones celulares en una bomba. Es así como la reorganización topológica preestablecida genéticamente permite que la motricidad celular individual y sus propiedades oscilatorias intrínsecas generen un evento macroscópico a través de la conectividad. Esta es la base de todo movimiento y será el hilo conductor de la discusión: la organización y la función de nuestros cerebros se basan en la integración de la morwidüd durante la evolución (ver Llinás, 1986).

Del tejido muscular contráctil a la organización del cerebro

Consideremos un bello caso ilustrativo de la organización general del desarrollo cerebral, el de los elasmobranquios (tiburones), cuyo embrión se desarrolla en un huevo con cubierta elástica que permite el paso de oxígeno. Para distribuir convenientemente el oxigeno a todos los tejidos embrionarios, los fluidos del huevo (ooplasma) deben moverse continuamente; para ello el embrión se ondula continua y rítmicamente de manera sinusoidal, lo cual es digno de atención, ya que en este estadio del desarrollo la actividad motriz no es aún generada por el sistema nervioso (Harris y Whiting, 1954). De hecho, ¡las células que conforman ta musculatura para

este movimiento rítmico aún no han sido inervadas por sus respectivas motoneuronas! Entonces, ¿cómo es que los músculos ya se contraen? En dicho estadio de desarrollo, rodas las células musculares están acopladas electrotónicamente (Blackshaw y Warner, 1976; Kahn etai, 1982; Amstrong et al. 1983).Es algo muy semejante al caso del corazón, sólo que aquí no se traía de un órgano, sino del animal entero. Al estar acopladas de esta manera las células permiten que la señal eléctrica, que se origina de la contracción de una célula muscular, se propague rápidamente de una a otra, produciendo las ondulaciones rítmicas del animal. Como en este estadio el movimiento emerge intrínsecamente de las células musculares, se le conoce como el estadio "miogénico" de la motricidad (Harris y Whíting, 1954) y sirve de base a funciones fisiológicas tan importantes como el inicio del sentido de la dirección rostral (hacia delante) que tendrá el organismo en el mar.

En el siguiente estadio de desarrollo ocurre una transformación funcional muy significativa. En la medula espinal las neuronas motoras comienzan a generar los axones, que viajan o "migran” a sus músculos específicos; en este momento, las neuronas también se hallan acopladas electrónicamente (O'Donovan, 1987; Walton y Navarrete, 1991; Mazza et al., 1992; Kandler y Katz, 1995). Conforme los axones emergentes contactan e inervan a sus respectivas células musculares, formando sinapsis electroquímicas (ya mencionadas en el capítulo 2), desaparece el acople electrotónico entre las células musculares (Amstrong et al, 1983), lo cual marca el final de la llamada motricidad miogénica. Se observa entonces que la capacidad de las células musculares de disparar movimientos ondulatorios macroscópicos se ha desplazado a la medula espinal (figura 3.2). En otras palabras, las propiedades de la organización motriz de la masa muscular se han interiorizado y están representadas por la conectividad y las propiedades eléctricas intrínsecas de los circuitos de la medula espinal. Este es el estadio conocido como motricidad neurogénica.

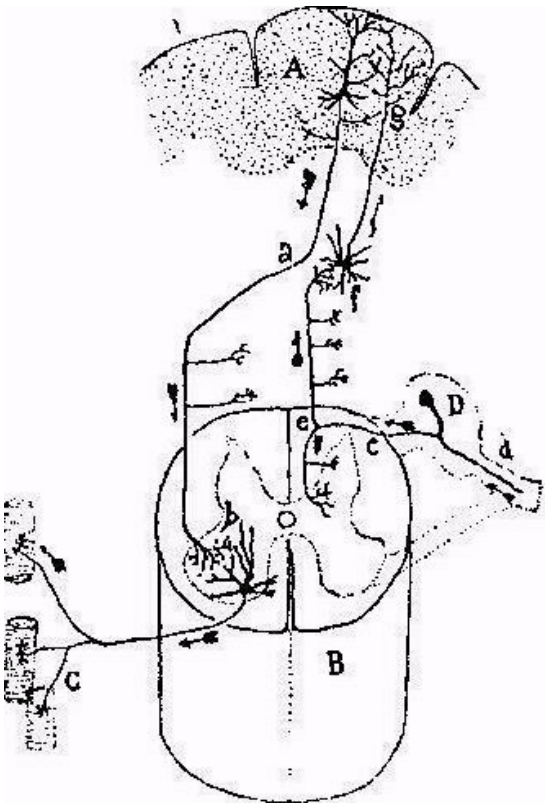


Figura 3.2

Diagrama de las vías centrales de entrada somato-sensorial y de excitación motora voluntaria de la corteza cerebral. (A) Corteza cerebral. (B) Medula espinal. (C) Fibras musculares que reciben lo entrada de neuronas motoras de la medula espinal. (D) Fibras aferentes que van de la periferia al ganglio" de la raíz dorsal. (Tomado de Ramón y Cajal, 1911, figura 27.)

Así pues, el movimiento neurogénico y las propiedades del músculo tienen un apareamiento dinámico (las mismas propiedades dinámicas) que resulta en una propiedad crucial para el sistema nervioso: la capacidad de interiorizar (apropiarse) las propiedades del mundo externo (en este caso de la musculatura), inscribiéndolas directamente en el tejido nervioso. Las motoneuronas permanecen acopladas electrotónicamente hasta el momento en el cual los centros del tallo cerebral (los cuales también están acoplados electrotónicamente) comienzan a establecer conexiones sinápticas con las neuronas motoras (Armstrong et al, 1983; Bleasel y Pettigrew, 1992; Welsh y Llinás, 1997; Chang et al. 2000). En este momento, el acople electrotónico de las neuronas motoras desaparece, pero persiste en las partes superiores del sistema. Además, las neuronas motoras comienzan a recibir entradas sinápticas de otras partes del sistema nervioso. Estas sinapsis no se relacionan específicamente con la activación de determinados grupos musculares pero afectan, en cambio, el movimiento global de la masa del animal; involucran al sistema vestibular, órgano del equilibrio que informa a la red neuronal motora (y por ende, al sistema músculo-esquelético) acerca de las propiedades holísticas de la motricidad. Al animal le resulta útil organizar su motricidad con un marco de referencia más amplio que el de su propio cuerpo, tal como la fuerza gravitacional de la Tierra y la inercia de los movimientos perpendiculares a la gravitación, y le resulta útil orientarse en cuanto a izquierda-derecha y arriba-abajo. Aparece entonces la encefalización (formación de aspectos maduros del cerebro, entre ellos su forma y su conectividad). Los animales elongados tienden a moverse según la ruta de menor resistencia en dirección de su eje longitudinal, lo cual predispone a que los movimientos más frecuentes se dirijan hacia lo que damos en llamar el frente. Este será el extremo anterior del organismo, el que encuentre lo novedoso del ambiente, y no el extremo posterior (que tiende a ignorarse por razones obvias). Por ende, lo más inteligente es colocar los sistemas sensoriales teleceptivos como el olfato y la vista en este frente delantero. También aquí

se encontrarán tas mandíbulas y se desarrollará una cabeza con un cerebro protegido por un exoesqueleto, el cráneo, que, entre otras cosas y por azar, servirá de parachoques. Por la misma razón, los productos desechables de la digestión se expelen por el extremo posterior, con la esperanza de no volverlos a encontrar nunca jamás.

La interiorización de la planta corporal

Vemos pues cómo se ha interiorizado la propiedad de la motricidad. La única manera de explicar la incorporación de la motricidad externa en el sistema nervioso es por medio de lo que llamamos interiorización. Pero, ¿cómo se efectúa esta interiorización de la motricidad cuando adentro nada se mueve (¡parece tan absurdo como e! levitar halándose los cordones de los zapatos!), y por qué es importante saberlo? Si entendemos cómo se logró este paso, comprenderemos algo importante respecto de nuestra propia naturaleza. El mecanismo de interiorización se relaciona íntimamente con la función básica del cerebro en lo que se refiere al pensamiento y la utilización de la experiencia. La interiorización es otro nombre a lo que conocemos como cableo neuronal dependiente de la actividad, o más profundamente lo que podemos denominar la selección neuronal activa. Ya vimos que la respuesta más directa propone que la interiorización se realiza mediante la activación y transferencia de las propiedades intrínsecas oscilatorias eléctricas de un nivel simple a uno más elaborado que emule las propiedades del mundo externo, en este caso inmediato, las propiedades del cuerpo (la planta motora).

Básicamente, las neuronas motoras disparan intrínsecamente, los músculos se contraen rítmicamente y los receptores musculares y de las articulaciones responden al movimiento e informan a las neuronas motoras que la planta (el cuerpo) se movió y mediante cambios en las uniones sinápticas se selecciona la conectividad de tal modo que se agrupen los elementos relacionados funcionalmente (motoneuronas extensoras con músculos extensores, etc.). Más tarde en el desarrollo esas conexiones servirán para verificar y reforzar los comandos motores cuando un movimiento se aproxima a la dirección deseada, según las coordenadas corporales. En otras palabras, la activación de motoneuronas genera un eco sensorial que les informa qué respuesta corporal generó su activación. De hecho, durante el desarrollo, los embriones generan brotes de temblor muscular no muy diferentes de pequeñas crisis epilépticas (Hamburger y Blaban, 1963; Bekoff et al, 1975). Esto no es una simple metáfora; la actividad epiléptica constituye probablemente uno de los estadios funcionales más primitivos, dado que se presenta de manera similar en diferentes especies y personas independientemente de factores educacionales o ambientales; es algo como estornudar o toser.

Así pues, mediante las propiedades oscilatorias intrínsecas y el acoplamiento electrotónico, las propiedades externas se interiorizan paulatinamente durante la evolución y dentro del sistema nervioso se desplazan hacia el polo delantero del neuroeje y se integran a la cefalización ¿El resultado final? La capacidad de pensar, cuyo origen se halla en la interiorización del movimiento, cosa que ya propuse en el capítulo 1 al mencionar que el pensamiento es un evento central, resultado de un número creciente de, exitosas estrategias pero no solamente de las partes del cuerpo o de objetos del mundo externo, sino de percepciones y de ideas.

Cefalización

Esta marcha hacia niveles superiores, cuyo resultado final es la cefalización, se observa durante el desarrollo embriológico (ontogenia) y también durante el desarrollo filogenético (la evolución). Por ejemplo, Filogenéticamente, el estadio neurogénico de la motricidad de la lamprea adulta revela la persistencia de acople electrotónico entre neuronas (Ringham, 1975; Christensen, 1976; Shapovalov, 1977; Batuela y Shapovalov, 1977; Batuela, 1987). Así, tanto en las lampreas como en el corazón, la motricidad se relaciona con el acople electrotónico celular. En este caso, el nadar en la lamprea equivale, en otra geometría, a una serie de latidos de corazón. La diferencia radica en que en el animal la onda de contracción se mueve de adelante

hacia atrás y en que son las neuronas acopladas eléctricamente las que controlan los músculos. La activación muscular retorna un mensaje a las neuronas por vía sensorial que además de informar respecto al movimiento, describe las propiedades del mundo externo como, por ejemplo, el cambio de las corrientes en las cuales nada, o el fondo del río en el cual se arrastra.

Evolutivamente, lo anterior plantea una cuestión crucial. La ventaja de separar la generación del movimiento de la generación del patrón motor radica en que esta separación permite especialización y por ende tipos de motricidad mucho más complejos. Esto se debe a las propiedades combinatorias producidas por la especialización del generador de patrones (las neuronas promotoras y su conectividad). Por ejemplo, si el problema de caminarse dejara en manos de las propiedades intrínsecas de nuestros músculos propiamente dichos, no llegaríamos ni a la esquina de la casa. La marcha requiere, además de las propiedades intrínsecas de los circuitos neuronales de la medula espinal (capitulo 2), los circuitos superiores del neuroeje situados en dirección cefálica. .Esto generará el impulso coordinado y rítmico que resulta en las sinergias musculares alternantes implicadas en la marcha. De igual manera, a pesar de que el corazón late por sí mismo, el sistema nervioso también modula la periodicidad de este ritmo intrínseco, como en el caso de estar aterrorizado.

El espacio funcional interno: los marcos de referencia del mundo externo y del mundo interno tienen diferentes sistemas de coordenadas

El lector ya debe comprender cómo la evolución empleó propiedades de la biología celular para interiorizar las propiedades del mundo externo en el sistema nervioso. Examinemos ahora cómo la función del sistema nervioso recapitula el proceso de interiorización. Al comienzo del capitulo señalé que, tal vez, el problema más importante en la investigación cerebral hoy en día es el de la interiorización de los universales dentro de un espacio funcional interno.

Es claro que para que un organismo interactúe exitosamente con su mundo externo, su sistema nervioso debe poder manejar (procesar y comprender) con facilidad y rapidez las señales que te llegan por los sentidos. Una vez que esta información es transformada en una señal motora adecuadamente ejecutada, se devolverá al mundo externo. Es obvio que las propiedades del espacio funcional interno y las del mundo externo son diferentes y, sin embargo, para que la salida motora tenga algún significado útil, deben guardar alguna semejanza entre sí. Este espacio funcional interno constituido por neuronas debe representar las propiedades del mundo externo (ver capítulo I) y, en cierto sentido, tener propiedades equivalentes. Así como un traductor debe operar con continuidad conceptual entre los dos idiomas que está traduciendo, también este espacio interno funcional debe preservar la continuidad conceptual.

¿Cómo opera entonces este espacio funcional interno? Preguntemos que características deben tener las propiedades de traducción —de hecho transformacionales— de este espacio, capaz de garantizar la continuidad homomorfa entre las propiedades sensoriales del mundo externo y la salida motora subsiguiente. Se trata de una pregunta fundamental acerca de las diferencias entre los marcos de referencia del sistema de coordenadas exterior (la planta) e interior (el cerebro), y acerca de la continuidad que puede y debe existir entre la percepción y la ejecución. Este problema lo abordé en colaboración con A. Pellionisz en una serie de artículos que abarcaron más de una década de investigación (ver, por ejemplo, Pellionisz y Llinás, 1979.1980, 1982.1985).

Un ejemplo ilustrativo a nivel intuitivo de que la transformación sensomotora es de hecho un sistema independiente de coordenadas sería el siguiente: supongamos que en el ejemplo del dibujo presentado al inicio de este capitulo vamos a dibujar dos versiones de una cara conocida. La primera versión es un dibujo grande, realizado principalmente con movimientos de la articulación del hombro y del codo y con un carboncillo ancho en la mano (figura 3.3 A, izquierda). En la segunda versión, la cara debe dibujarse con el antebrazo rígido y sólo con movimientos de los dedos (figura 3.3 A. derecha). Obviamente, este dibujo será mucho más pequeño, pero si se hace una ampliación fotográfica para compensar el tamaño (figura 3-1 B) y

se superponen ambos dibujos (figura 3.3 C), las caras son notablemente semejantes, siempre y cuando que, claro está, ¡se tenga muy buena habilidad para el dibujo! (El dibujo de la figura 3.3 es de un artista muy conocido.) ¿Qué significa lo anterior? Indica que la representación interna de la cara puede exteriorizarse mediante diferentes sistemas de coordenadas sensoriales y motoras, es decir que, independientemente del sistema de coordenadas, el vector interno de representación de la cara puede transformarse en un espacio de ejecución motora. Ello es un claro ejemplo de que las propiedades tensoriales (transformaciones vectoriales independientes del sistema de coordenadas) operan en las transformaciones sensomotoras.

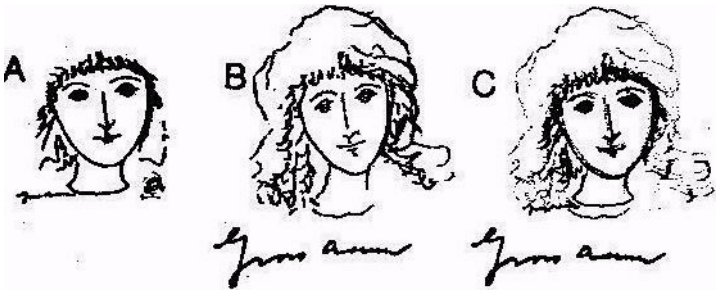


Figura 3.3

Exteriorización mediante diversos conjuntos de coordenadas motoras y sensoriales. (A) Figura compuesta de un dibujo de tamaño grande del artista Arnold Gross. de Budapest, realizado con movimientos libres del codo y hombro y versión en formato pequeño, del mismo dibujo realizado sólo con movimientos de la mano (abajo a la derecha). (B) Ampliación del dibujo de formato pequeño de (A). (C) Superposición de (A) y (B) en la cual se observa la gran semejanza entre ambos dibujos. (Tomado de Llinás. 1987, figuro 23.6, p. 355.)

Geometría funcional

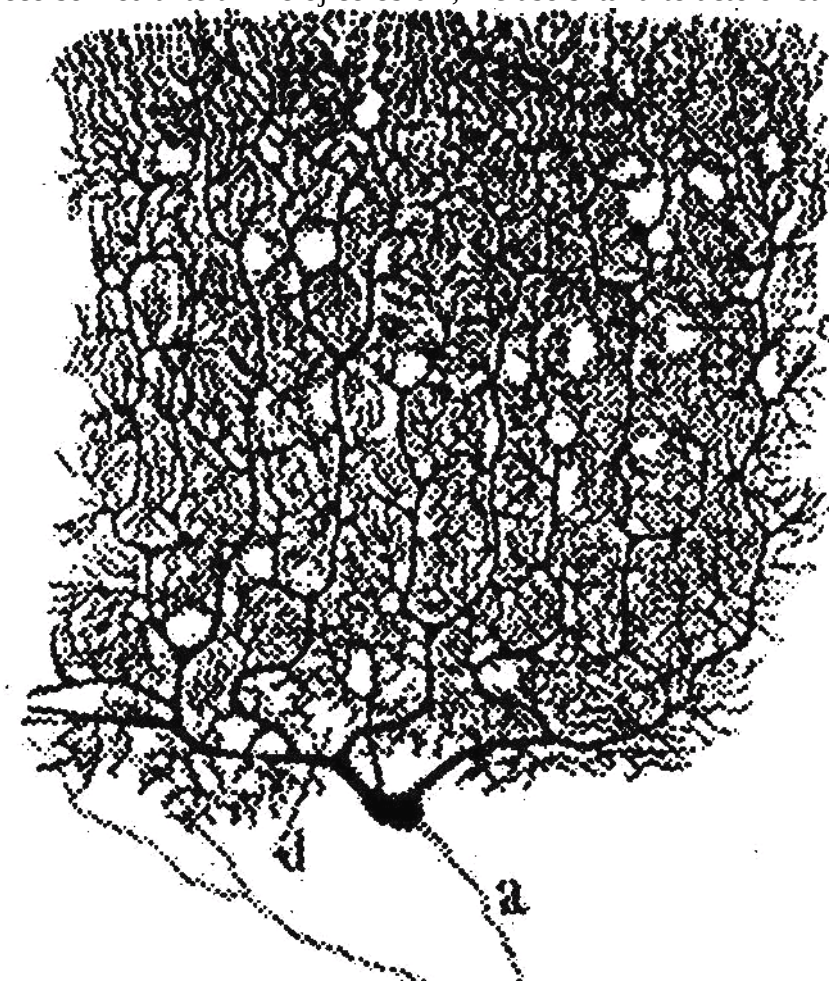
Otro principio organizador igualmente importante se basa en que el carácter de las relaciones entre neuronas puede ser más temporal que espacial. Este mapa temporal puede entenderse como un tipo de geometría funcional (Pellionisz y Llinás, 1988). Estas propiedades sólo se empezaron a entender recientemente, pues requieren registros simultáneos de actividad de numerosas neuronas, lo cual no es un parámetro frecuentemente abordado en neurociencia. En pocas palabras, la premisa central de la hipótesis es que el mapeo espacial crea un universo finito de posibles representaciones. Si a ese mapa se añade el componente temporal, resulta un conjunto de posibles representaciones inmensamente superior. De hecho, la superposición del mapeo espacial y temporal mediante la repetición resonante tálamo-cortical permite llegar a un tipo de categorización que es gigantesca. Este diálogo temporo-espacial entre el tálamo y la corteza es lo que genera la subjetividad.

El caso del sistema nervioso central (SNC) es comparable al de fotografiar un objeto en movimiento, no con un flash instantáneo y una sola fuente luminosa, sino con un conjunto de luces (en el SNC, serían los axones), cada una de las cuales tiene diferentes tiempos de conducción. La "fotografía" interna en el SNC de la realidad externa, generada mediante señales neuronales con tiempos diferenciales de llegada, implica que los eventos externos simultáneos no se representarán como tales en el SNC. A la inversa, 'tampoco se producirá un conjunto simultáneo de eventos externos ante disparos simultáneos de neuronas cuyas velocidades de conducción sean diferentes. Un reloj sólo podrá determinar la "ocurrencia simultánea" de un evento si tiene acceso instantáneo al evento "cronometrado" (o que, de alguna manera, sea sincrónico). En el SNC no es posible establecer la simultaneidad, porque la diferencia entre la velocidad de los eventos controlados (por ejemplo, los movimientos) y la de las señales de control (disparos neuronales que se propagan lentamente), no es lo suficientemente importante como para permitir que, a través de los axones, se acceda instantánea y sincrónicamente a determinado reloj. Por tanto no es posible aplicar este concepto al funcionamiento interno de los sistemas neuronales. (Un ejemplo gráfico del problema de la sincronización temporo-espacial,

por parte de un reloj central, es el de un comando central militar que intentara coordinar la posición y velocidad de sus tanques de guerra, no con señales instantáneas de radio, sino con mensajes llevados a caballo.)

Es claro que, en ausencia de señales de comando extremadamente rápidas, se impone encontrar una forma de sincronización temporo-espacial que no se base en el concepto de simultaneidad.

En la misma línea de pensamiento, el cerebro debe utilizar un modo alterno de sincronización temporo-espacial, pues los eventos simultáneos dentro del SNC no pueden establecerse mediante un "reloj cerebral", incluso si tal artefacto existiera.



Dibujo de una neurona típica.

4
LAS CÉLULAS NERVIOSAS Y SUS PERSONALIDADES

La unidad celular da lugar a la unidad mental

Se ha mencionado varias veces ya que la mente es uno de los muchos estados funcionales globales del cerebro. Otro modo de decir lo mismo es que "la mente es uno de los muchos estados generados por la sociedad de neuronas que llamamos cerebro". Recordemos la revisión del concepto de mente y de su adquisición a partir de la integración evolutiva de la motricidad. Adhiriendo a los principios de la electrofisiología y la biofísica, disciplinas bien establecidas actualmente, pasemos a fundamentar esta visión sobre bases científicas sólidas.

Las cuestiones concernientes a la función de la mente se rigen por las mismas reglas biológicas que resultaron en la evolución del sistema nervioso a saber, el desarrollo evolutivo por ensayo y error por parte de la selección natural, tanto en células singulares como en el animal como un sistema completo.

Es importante identificar las propiedades que les permiten a las células nerviosas organizarse en una red social capaz de representar universales e interactuar significativamente, y en tiempo real, con el mundo exterior. A nivel microscópico, esta propiedad es la actividad eléctrica neuronal, producto de su excitabilidad intrínseca, de su conectividad sináptica y de la arquitectura de las redes que entretejen. La arquitectura macroscópica es fácil de comprender. Por ejemplo, en el ojo las neuronas de la retina se interconectan formando una delgada capa de tejido transparente extendida sobre un trasfondo negro sobre la superficie interna del fondo del ojo. La organización es tal que los lentes de tejido transparente de la parte anterior del ojo (cornea y cristalino) proyectan una imagen luminosa sobre la superficie retiniana la cual responde a tal imagen. La organización de la red de neuronas de la retina debe garantizar que las señales eléctricas transmitan fielmente las imágenes luminosas al cerebro usando señales eléctricas.

En el cerebro la variedad en las propiedades eléctricas de las neuronas y su conectividad permiten que las redes cerebrales interioricen las imágenes del mundo externo y las transformen en comportamiento motor. Tales redes generan las tormentas eléctricas fugaces que señalan el rápido y continuo cambio en la realidad exterior. Esos eventos eléctricos son lo suficientemente ricos para representar a nivel celular todo lo observable o imaginable. La mente y el yo son, en fin, interpretaciones propias de las redes neuronales.

Aquéllos de nosotros que rutinariamente realizamos registros electrofisiológicos, no dudaríamos en afirmar que hay pocos sucesos tan maravillosos y emocionantes como ver impulsos eléctricos neuronales, registrados intracelularmente, titilando en la pantalla del osciloscopio y oír el sonido de una neurona viva, mediante un parlante, cuando intercambia información con otra neurona en su "lenguaje" particular (véase recuadro 4.1). Cuando hablo de los diferentes tipos de actividad eléctrica de las neuronas me refiero tan solo a una de las metodologías que se utilizan para caracterizar las neuronas. Más adelante hablaremos de otras técnicas electro-fisiológicas como el registro extracelular de potenciales de acción y de la pinza de voltaje utilizando sellos de alta resistencia entre el electrodo y la superficie de membrana celular. Con tal técnica se pueden registran las pequeñas corrientes iónicas que pasan a través de canales iónicos específicos encajados en el espesor de la membrana celular y que comunican el interior con el exterior de las células. Rutinariamente se registra la actividad de las células en cerebros de animales o de humanos (durante ciertas neurocirugías), lo que aporta importantes datos sobre la función cerebral y el diagnóstico di-' enfermedades neurológicas. También se hacen registros en tajadas de tejidos vivos mantenidos en soluciones iónicas oxigenadas o en cultivos de células in vino.

Recuadro 4.1
¿Como se estudia la actividad eléctrica de células aisladas?

Cuando se estudian los propiedades intrínsecas eléctricas de las células nerviosas, por ejemplo, los de lo oliva inferior, se encuentra que las células están dotadas de un potencial de membrana no constante sino oscilante con uno ritmicidad semejante o la sintonización con un diapasón. En registros in vitro, el rango de la frecuencia de tal oscilación eléctrico es de 4Hz - 12Hz oscilaciones por segundo (Llinás y Yarom 1981 a, b). Los registros directos con microelectrodos en el interior de neuronas individuales demuestran estas propiedades.

Los microelectrodos de registro intracelular son tubos de vidrio de 1 -1.5 Mm. de diámetro, llenos de una solución iónica conductora. Las puntas muy finas del microelectrodo atraviesan la membrana de la célula sin ocasionarle mayor daño. Los microelectrodos se fabrican fundiendo y estirando delgados tubos de vidrio (pipetas) aplicando tensión mecánico mediante un tipo de microabrazadera que sujeta el tubo cerco de su punto medio. Estas abrazaderas halan en dirección opuesta la pipeta al mismo tiempo que se mantiene caliente el punto medio entre ellas con un filamento eléctrico. A medida que el vidrio se derrite, la tensión hace que la pipeta se estire hasta convertirse en una corta y delgada punta. En este momento, el vidrio se separa formando dos microelectrodos. Después del estiramiento, la punto de coda microelectrodo continúa siendo un tubo abierto, con un diámetro de apertura de apenas un cincuentavo de micrómetros — menos de 1 milésimo del grosor de un cabello humano e invisible sin el uso de un microscopio electrónico.

Después del estiramiento el electrodo se lleno con una solución Iónica conductiva, mediante una jeringa. Se fija entonces el microelectrodo al manipulador mecánico que controla en forma muy precisa el movimiento de inserción (tornillo micrométrico) lo que permite insertar el micro electrodo en uno célula sin lesionarlo. Por el extremo opuesto del electrodo, que está lleno de medio conductivo, se introduce un hilo de plata conectado a un amplificador electrónico muy sensible cuyo señal de salida se filtra y se amplifica de nuevo; posteriormente, la señal se digitaliza y se almacena en un computador o se visualiza directamente en un osciloscopio de rayos catódicos, A menudo, lo señal se envío a un altoparlante, de suerte que cada evento eléctrico se puede "oír".

El reducido diámetro de la punta del electrodo permite microelectrodos muy agudos, cosa muy importante, pues es vital no desgarrar la delgada membrana de la neurona al introducir la punta del electrodo. De suceder esto, el delicado equilibrio de la solución iónica enseguida se alterará pues el fluido extracelular — la solución iónico fuera de lo neurona — se mezclará directamente con el fluido intracelular. Esto compromete severamente el frágil medio electroquímico dentro de lo célula — y genera la muerte de ella.

No entraré en la tediosa descripción de cómo lograr que la punta del electrodo penetre en la membrana celular de una neurona (cuyo cuerpo tiene un diámetro típico del orden de unos 20 micrones) de alguna región del cerebro. Las deflexiones de voltaje en el osciloscopio son útiles como brújula paro determinar dónde se encuentra la punta del electrodo y hacia dónde se dirige. Basta con decir que el trabajo de penetrar tales neuronas y de monitorear y registrar su actividad eléctrica no es una hazaña despreciable y requiere tanto paciencia y diligencia como la necesaria para encontrar "una aguja en un pajar".

¿Por qué estudiar las células? La Improbabilidad de la vida multicelular organizada

Según los geólogos, la tierra tiene 4.5 billones de años. Los paleobiólogos estiman que la primera forma conocida de vida emergió unos 400 - 500 millones de años después, bien fuera por semillas extraterrestres (transportando el proceso a otro lugar) o por una forma de generación espontánea a partir de asambleas de polímeros orgánico» de arcilla inanimada (Margulis y Sagan 1985). Las primeras células que aparecieron, llamadas "procariotas", fueron esencialmente organismos unicelulares, relacionados con las bacterias y los organismos bacteriformes

contemporáneos. Las cepas originales de los procariotas parecen haber cambiado muy poco, por lo que se dice que, evolutivamente, han sido "altamente conservadas". Un buen ejemplo es la Escherichia coli (figura 4,1, izquierda) benigno habitante de nuestros intestinos y cuyos esqueletos conforman gran parte de los desechos sólidos que excretamos. En otras partes del cuerpo estas bacterias no son nada benignas y pueden causar graves infecciones.

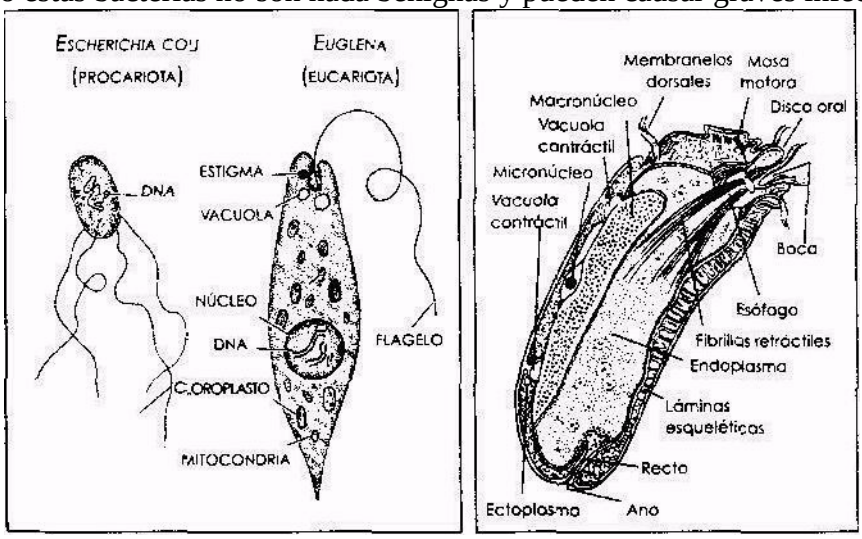


Figura 4.1

Ejemplos de formas unicelulares procarióticas (izquierda) y eucarióticas (mitad, derecha). (Izquierda) E. coli, (medio) Euglena protista típico no especializado, con un núcleo, mitocondrias y cloroplastos. (Derecha) Epidinium, célula aislado altamente especializada, con una estructuro oral permanente y un sistema digestivo con esófago, recto y ano. Las duras retráctiles de tipo muscular mueven la boca y el esófago mediante uno especie de red neuronal. Todas estos fibras convergen y se conectan en una única '-nasa motora, semejante a un centro de comando o a un generador central de Patrones. (Figuras de la izquierda y del medio tornadas de Gould y Gould, 1989, p.10: figura de lo derecha tomada de Simpson et al. 1937, figura 3-13. P.54.)

Tales organismos primitivos son esencialmente pequeños compartimentos recubiertos por dos o tres tipos de capas. La más interna es una membrana, envoltura delgada y grasa conocida como la bimembrana (doble capa) lipídica. Igualmente, el exterior viene protegido por una pared de proteoglicanes que, a su vez, puede estar cubierta por una capa externa de células llamada cápsula (Margulis y Sagan 1985; Margulis y Olendzenski 1992; Colé et al., 1992; Lengeler et al., 1999). Estas celdillas (o células) contienen líquido intracelular o citoplasma con el ADN, ARN, los ribosomas y la maquinaria enzimática que lee el código genético evolutivo y que fabrica las proteínas necesarias para la función celular. Sin embargo, en los procariotas, el material genético no está separado en un núcleo como sí sucede en las células más modernas eucariotas ("verdaderas células").

En los siguientes 600 millones de años, algunos procariotas aprendieron a parasitar a otros procariotas para finalmente conjugarse en forma mutuamente benéfica. Éste es el significado biológico del término "simbiosis". Con el tiempo, la simbiosis procariótica llevó a tipos más elaborados de células, lo que posiblemente dio lugar a la primera célula eucariótica (ver, por ejemplo, Margulis y Oledzenski 1992; Ridley 1996). Las células eucarióticas son de mayor tamaño que las procarióticas, su membrana externa es bien definida y su arquitectura interna, más rica, con compartimentos rodeados de membranas, tales como el núcleo y oíros pequeños órganos internos u organelos bien estructurados (figura 4.1, centro, derecha). Como en el caso de los procariotas, los eucariotas fabrican, internamente, las muchas proteínas necesarias para sobrevivir, algunas de las cuales se especializan y son expuestas en la membrana celular externa. Tales proteínas regulan el intercambio de materiales entre et interior y el exterior de la célula, así como la señalización de muchos eventos intracelulares autoespecíficos.

Tenemos pues estas pequeñas islas de vida inherente, encerradas entre "paredes", membranas celulares lipídicas, y en gran parte, aisladas del mundo externo. Son sistemas cerrados en cuanto que sólo se comunican — y de hecho solamente pueden comunicarse — con el mundo externo mediante compuertas especializadas a través de la membrana. La mayoría de estas compuertas se compone de una o más cadenas largas de aminoácidos plegados como nudos complejos pero altamente ordenados. Al integrarse a la membrana, estas proteínas conforman sistemas de señalización a modo de receptores específicos, canales iónicos o bombas. Estos compartimentos primordiales biológicos constituyen rodas las formas de vida conocidas hoy en día. Los sistemas cerrados comenzaron a operar hace muchísimo tiempo; y fundamentalmente la vida, como la mente, se compone de compartimentos rodeados de membranas, tales como el núcleo y otros pequeños órganos internos u organelos bien estructurados (Figura 4.1., centro, derecha).Como en el caso de los procariotas, los eucariotas fabrican, internamente, las muchas proteínas necesarias para sobrevivir, algunas de las cuales se especializan y son expuestas en la membrana celular externa. Tales proteínas regulan el intercambio de materiales entre el interior y el exterior de la célula, así como señalización de muchos eventos intracelulares autoespecíficos.

Tenemos pues estas pequeñas islas de vida inherente, encerradas entre “paredes”, membranas celulares lipídicas, y en gran parte, aisladas del mundo externo. Son sistemas cerrados en cuanto que sólo se comunican – y de hecho solamente pueden comunicarse – con el mundo externo mediante compuertas especializadas a través de la membrana. La mayoría de estas compuertas se compone de una o más cadenas largas de aminoácidos plegados como nidos complejos pero altamente ordenados. Al integrarse a la membrana, estas proteínas conforman sistemas de señalización a modo de receptores específicos, canales iónicos o bombas. Estos compartimentos primordiales biológicos constituyen todas las formas de vida conocidas hoy en día. Los sistemas cerrados comenzaron a operar hace muchísimo tiempo; y fundamentalmente la vida, cómo la mente se compone de compartimentos.

Resulta ilustrativo que, una vez que aparecieron estos organismos eucarióticos unicelulares, la evolución se tomó otros dos billones de años para unirlos en cooperativas celulares y, en lo que llamaríamos, las primeras forma de vida multicelular (para referencias generales, ver Margulis y Olendzenski 1992; Ridley 1996). Estas células eucarióticas parecerían haber escogido no conformar sociedades celulares Íntimamente agregadas. Un período de dos billones de años es muy largo, particularmente al considerar que, una vez logrado el primer "animal" simple, el resto de todo el reino animal (hasta hoy en día) emergió de modo comparativamente rápido (¡700 millones de años!).

¿Qué demoró tanto?

¿Por qué un período tan exorbitantemente largo para pasar de formas unicelulares a formas multicelulares? Examinemos lo que le implica a la naturaleza hacer un "animal"; es decir, una sociedad altamente organizada de células, o para el caso, cualquier sociedad exitosa. Debe existir un acuerdo en cuanto a los elementos comunes y a la comunicación entre los participantes, así como un conjunto de reglas globales a las cuales al menos la mayoría de ellos se adhiera. La clave del misterio es la siguiente: la tarea de otorgar a las células individuales la capacidad de intercambiar entre si información biológicamente significativa resultó, evolutivamente, ¡más complicado que fabricar la primera vida unicelular!

Sin ser buenos jueces al respecto, nos parece que dos billones de años es mucho, mucho tiempo, para que la evolución inventara la comunicación entre células y sólo podemos aventurar algunas especulaciones al respecto. Probablemente, sin algunas especializaciones que vendrían posteriormente, la agregación celular simplemente no ofrecía ninguna ventaja para la supervivencia: un tanto egoísta, pero quizás profundamente cierto. Sin embargo, cuando ocurrió la transición de la vida unicelular a la sociedad multicelular, emergió un nuevo abordaje hacia la vida que nos acompaña desde entonces.

Este enfoque enfatiza el compromiso total hacia la sobrevivencia de la sociedad celular (el

"grupo" como el si mismo) en contraste con el compromiso total de la célula hacia la sobrevivencia individual (el "individuo" como el sí mismo). Como ejemplo de lo que hablamos, recordemos que cuando los seres multicelulares evolucionaron, se creó por primera vez la verdadera "muerte colectiva" programada. Recordemos que aunque tos organismos unicelulares pueden ser destruidos, también se puede suponer que normalmente tales células no mueren sino simplemente se dividen. Podría decirse que cualquier ameba de hoy en día en realidad nunca ha muerto, sino que, durante milenios, se ha dividido en dos muchas veces — una entidad inmortal hasta que alguien pise la última (o la primera). En cambio, la muerte de ciertos grupos de células de una entidad multicelular puede llevar a la muerte de todas las demás células, independientemente de qué tan saludables' se encontraran en un comienzo (como cuando una persona muere' por un disparo en el corazón o en el cerebro). Lo anterior representa la pérdida de un principio muy importante: la capacidad (y el propósito) de la célula individual de mantener y proteger su propia vida. La esencia de nuestra naturaleza como seres multicelulares es ese compromiso de las sociedades celulares que emerge cuando la célula individual reemplaza sus principios de supervivencia propios por los de la sociedad en que vive. En un organismo multicelular las células individuales no pueden romper sus lazos con el grupo y "alejarse del problema" cuando la cosa se pone color de hormiga; esta capacidad se canjeó por la vida social.

Las células de las sociedades multicelulares cambian ciertas libertades por otras: la libertad de interactuar aisladamente y de afrontar los peligros de la vida solitaria se reemplaza por la de "sindicalizarse" y de gestionar en grupo, y al hacerlo, de perder o ganar como grupo.

Un segundo requisito para la evolución animal fue el desarrollo del suministro de combustibles de alta energía a células ávidas de ellos, atrapadas y empaquetadas en arreglos inmóviles. Para ello es necesario el metabolismo oxidativo y un sistema digestivo que, mediante un sistema circulatorio, aporte nutrientes de alta energía a grupos celulares densamente empaquetados. Las células individuales, carentes de exoesqueleto (al contrario de las plantas), no sobreviven fuera de un medio acuoso con determinados nutrientes y los eucariotas no sobreviven mucho tiempo sin oxígeno. Los animales solucionaron este problema atrapando este vital fluido y llevando con ellos su propio océano interno (sangre y fluido extracelular).

La tercera razón por la cual la evolución probablemente tardó tanto en desarrollar animales es la complejidad celular. Piénsese en lo que en realidad implica hacer que una célula se comunique con otra. En un principio, las células de linajes genéticos diferentes desarrollaron un lenguaje biomolecular que dio lugar a una comunalidad de reglas, a un dominio bíopolítico de la vida en general. En esencia, las células tuvieron que adquirir la capacidad de recibir, interpretar y enviarse señales claras por ensayo y error. Probablemente, al comienzo lo hicieron como células hijas de una mutua división celular, unidas por "puentes" citoplasmáticos que les impedían separarse completamente, o mediante algún "pegamento" mucopolisacárido en su superficie (como el de la colonia celular primitiva vólvox; ver la referencia en Kirk 1998). Más tarde se unieron en grupos celulares heterogéneos, como parientes distantes pero genéticamente relacionados, después en colonias y finalmente en grupos homogéneos con el mismo código genético, pero en el que cada célula expresa sólo una parte de dicho código, lo que permite la especialización celular ya mencionada.

Entonces surge la pregunta ¿qué se gana evolutivamente con esta nueva filosofía de orden? La respuesta es obvia; los grupos celulares tienen propiedades emergentes ausentes en las células aisladas. Entre tales propiedades se cuenca la capacidad de las células individuales de diferenciarse del grupo, es decir, la especialización para tareas específicas (a expensas de su propia autonomía), en un grado imposible para formas de vida unicelulares en donde todos los requisitos para la sobrevivencia deben hallarse presentes en cada elemento individual.

"Fuego" primitivo — las células aisladas comenzaron a emplear "herramientas" intracelulares y extracelulares

La comunicación intracelular progresó enormemente cuando las células lograron controlar

la concentración intracelular del Ion calcio (Kretsinger 196,1997; Pietrobon et al, 1990; Williams 1998). El calcio es uno de los elementos más reactivos de la tabla periódica y es muy difícil de domesticar. En un medio salino como el mar, el calcio se amortigua a 10 milimolares o sea a 0.4 grs. por litro (es decir, la concentración de calcio del agua de mar es de 4 gramos/ litro). Por su alta reactividad, en concentraciones superiores, el calcio forma cristales (fosfato y carbonato de calcio), teniendo como resultado cosas como el mármol o las conchas. De tal modo, si la concentración del calcio en el mar fuera tan alta como la del sodio o potasio (cuyo rango milimolar es de unos cientos) se transformaría en "roca", y la roca como el cemento son la antítesis de la vida.

Y, sin embargo, la evolución hizo del calcio uno de los requisitos de la vida — y aprendió a regularlo con gran precisión, a pesar de la peligrosa relación "amorosa" con otro elemento, el fósforo (Kretsinger 1996, 1997). ¿Cómo y por qué se permitió que un elemento tan intensamente reactivo apareciera en el interior de la vida eucariótica?

El fósforo es crítico para la vida eucariótica. Para efectuar tareas de alto gasto energético como la contracción muscular y la actividad de las células nerviosas, los eucariotas deberán extraer, de alguna forma, la mayor cantidad de energía útil a partir de moléculas combustibles. La utilización del oxígeno requiere la fosforilación oxidativa que es la fuente más importante de energía celular. Pero para controlar el fósforo, con miras a su ulterior fosforilación oxidativa, la vida eucariótica tuvo que aprender a "defenderse" del caldo, o de lo contrario éste se robarla el fósforo de la célula y lo cristalizaría, terminando así la vida. Como en la mejor de las tragedias de Shakespeare: el evento deseado debe evitarse. Ante la amenaza del calcio, los eucariotas desarrollaron moléculas que lo reconocen y lo enlazan, con lo cual le impiden moverse libremente dentro de la célula, protegiéndose así de potenciales enlaces peligrosos con el fósforo.

Vemos, pues, que el calcio fue para la célula eucariótica lo que el fuego para los humanos primitivos. Nuestros ancestros necesitaban controlar el fuego y su relación en él debió ser la que hoy expresamos como "ni tan cerca que nos queme ni tan lejos que no lo alumbre". De hecho, el control del fuego nos hizo un animal muy poderoso y así como aprendimos a controlarlo, los eucariotas aprendieron a controlar el calcio. La evolución aprovechó el arnés de la calmodulina en el calcio y comenzó a explotar su reactividad para propósitos de la mayor utilidad.

Con el fósforo aislado y a salvo para que cumpliera con su cometido en la fosforilación oxidativa, les células eucarióticas lograron transportar y utilizar el oxígeno. El desarrollo de la calmodulina hizo del complejo calcio/calmodulina una importantísima herramienta intracelular para un sofisticado sistema de señalización. Las concentraciones de calcio, normalmente muy bajas dentro de la célula, permitieron que se le explotara para lo que hoy conocemos como "segundo mensajero". Estas funciones son criticas para transmitir la información que regula el inicio de las reacciones enzimáticas rápidas y localizadas, originarias de eventos como la contracción de la célula muscular, la elongación de los axones, la transmisión sináptica y la muerte celular programada. Este hecho primordial de la evolución eucariótica dio pie a los requisitos biológicos para que las células se agruparan en sociedades organizadas y en mutua comunicación.

Las neuronas emergieron en el espacio entre la sensación y el movimiento primitivo; y en él surgió el cerebro

Para el siguiente acto de este drama, revisemos el tunicado marino del capítulo 1, forma marina sésil enraizada en el fondo del mar que sobrevive filtrando el agua. Cuando se reproduce, el tunicado lo hace por gemación liberando larvas que, por breve tiempo, tienen forma natatoria. Como ya lo señalé, estos pequeños personajes están bien equipados para gestionar las demandas de la natación, ya que tienen un "cerebro" primitivo (uno o más ganglios), un "ojo" rudimentario y un órgano de equilibrio (Romer 1969). Una vez liberadas del adulto sésil, las larvas, especies de renacuajos, se alejan nadando, encuentran alguna grieta o hendidura, asientan en ella el extremo cefálico, literalmente digieren la mayor parte de su cerebro y revierten a la forma adulta

de esta especie que es más primitiva y sésil- La lección de lo anterior es que el cerebro solamente es necesario para criaturas que se mueven activamente.

Figura 4.2

Fragata portuguesa frecuente en regiones tropicales y subtropicales del Océano Pacífico e Índico y en la Comente del Golfo del Atlántico Norte. Su flotabilidad en flotador en forma de vejiga llena de gas de unos 3-12 pulgadas de largo. Por debajo del flotador se encuentran agrupaciones de pólipos de los que cuelgan los tentáculos que pueden medir hasta 30 pies de largo (en algunas especie; llegan a medir 165 pies). Los tentáculos tienen unas estructuras urticantes que paralizan o los peces pequeños u otras presas (tomado de los sitios Web WWW .best5.net / animal (viewlmg/ y www.britanica.com/seo/p/portuguese-man-of-war).

Consideremos ahora la presión evolutiva que originó el sistema nervioso examinando un organismo primitivo sin cerebro, como la fragata portuguesa, en el cual el concepto impulsor ya mencionado desempeña un papel importante (figura 4.2). La fragata portuguesa es lo que se conoce como un "superorganismo", es decir, realmente una colonia de células genéticamente relacionadas, algunas de las cuales se especializan en flotación o en protección de la colonia como un todo y otras lo hacen con propósitos de alimentación y reproducción. Estos elementos se comunican entre-sí, por lo que, aun careciendo de cerebro, de una red centralizada de neuronas, la fragata portuguesa tiene considerables poderes de coordinación.

¿Cómo puede ser esto? Porque las células que conforman la "ágata se organizan de modo tal que, aun careciendo de sistema .nervioso organizado, hay una relación mutua entre los elementos, "sensoriales" (células que detectan diversas formas de energía mecánica, térmica, etc.) y los "motores" (células que generan la retracción de los tentáculos). La relación entre la función sensorial y la motora se observa cada pocos minutos; cuando los lados del brillante órgano azuloso de flotación del organismo se sumergen bajo el agua para humedecer los tejidos de la cámara de gas; posible-. .mente, en este caso, la señal sensorial sea el grado de "sequedad" del tejido.

Las transformaciones sensomotoras de los organismos primitivos multicelulares como la esponja permiten observar que las células móviles (que generan movimiento) responden directamente con una onda de contracción a la estimulación sensorial: al tocarla, se moverá, siempre en igual forma. La magnitud de la respuesta, es básicamente proporcional a la magnitud del estímulo. Esta forma de acople directo sensomotor se observa cambien en muchas plantas terrestres. Al ascender en la escala evolutiva, las funciones sensoriales y contráctiles, que en la esponja se combinaban en un solo tipo de célula, en la anémona de mar comienzan a segregarse evolutivamente en dos elementos diferentes. La célula con función sensorial responde a los

estímulos generando un impulso eléctrico (o una serie de impulsos según la magnitud del estímulo) que le permite al elemento motor o contráctil de la célula hacer su trabajo. Lo interesante en este caso es la especialización funcional de la célula sensorial: ya no puede generar movimiento por sí misma, puesto que ahora se especializa en recibir y transmitir información. Es semejante a una neurona motora en cuanto que ésta solamente activa al músculo, pero ella misma no se mueve. El siguiente paso evolutivo consistió en interponer una neurona motora entre la célula sensorial y la motora. En este caso, la neurona motora activa las fibras musculares, pero sólo responde a la activación de la célula sensorial.

La Interneurona

Con la evolución de! sistema nervioso central (SNC), hace su aparición otra neurona que se ha denominado "interneurona", que se yuxtapone entre la neurona sensorial y la motora- En sentido estricto, una interneurona se define como cualquier célula nerviosa que no se comunique directamente sino con otra neurona en el SNC. Las inrerneuronas envían y reciben señales de otras neuronas mediante contactos sinápticos, que sirven en las formas primitivas para redireccionar y redistribuir la entrada sensorial a diversos componentes del sistema motor (las neuronas motoras y las células musculares que inervan). Al examinar la medula espinal vertebrada, se verá que sus interneuronas distribuyen la información sensorial recibida hacia las neuronas motoras o hacia otras neuronas del sistema nervioso central. La gran ventaja de "halar con muchos hilos a la vez". Los estímulos sensoriales que activan unas pocas células sensoriales cambien activan un reducido conjunto de interneuronas, el cual, a su vez, provoca una respuesta motora compleja por parte de numerosos elementos contráctiles controlados en diferentes segmentos espinales de conectividad. Por la profusa ramificación de su conectividad hacia la parte anterior, el animal se torna capaz de efectuar movimientos amplios, bien definidos, que implican la activación de numerosos músculos de todo el cuerpo.

Pero no sólo en la medula espinal hay interneuronas; éstas sé hallan en todo el sistema nervioso central y además pueden verse no solamente una, sino muchas interneuronas yuxtapuestas entre la célula sensorial y la motora. Adhiriendo a la definición de interneurona como cualquier célula nerviosa que no se comunica directamente con el mundo externo, entonces las células tálamo-corticales (y córtico-talámicas para el caso) también son interneuronas. En este sentido, la gran mayoría de neuronas de nuestro' cerebro son, de hecho, interneuronas (figura 4.3). En términos modernos, las interneuronas se definen como neuronas que no proyectan sus axones fuera del dominio (región cerebral) en el que habitan, y por esta razón también se les llama neuronas de circuito local. Las que establecen contacto con otras regiones cerebrales se denominan neuronas de proyección. Bajo este óptica, resulta aun .más claro que casi siempre el cerebro funciona como un sistema cerrado. Esta masa intrincadamente entretejida de neuronas opera como un sistema cerrado para efectuar transformaciones sensomotoras. Este sistema recibe información del mundo externo y los resultados de sus operaciones se devuelven al exterior bajo la forma de movimiento activo e intencional necesario para la sobrevivencia.

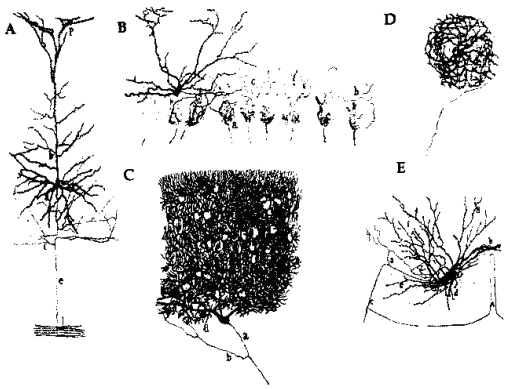


Figura 4.3

Dibujos de neuronas del cerebro y de la medula espinal. (A) Célula piramidal de la corteza cerebelar de un conejo. (B) Célula en canasta del cerebelo con axones que terminan en configuraciones tipo canasta sobre los cuerpo; • celulares de muchas células de Purkinje, en el cerebelo humano, (D) Célula de la oliva inferior. (E) Neurona motora fetal de lo medula espinal del gato, con un axón que sale de la medula espinal por lo raíz ventral para terminar en un músculo. (Tomado de Ramón y Cojal. 1911.)

El espacio funcional en el que se producen y posteriormente se implementan las estrategias motoras se genera en tales neuronas y es en ellas donde se constituye el espacio de nuestro pensamiento.

Células nerviosas y sus personalidades

Así pues, ¿qué es una neurona? Las neuronas o células nerviosas constituyen una extraordinaria especialización de las células eucarióticas a partir de la cual las asambleas celulares desarrollaron una "computación" natural. Una vez evolucionadas, las neuronas constituyeron la estructura central de todos los cerebros en todas las formas animales: transmiten información, construyen, soportan y memorizan el mundo interno — mundo compuesto de neuronas que simula la realidad externa apropiándose de sus principios operativos, para después volver a introducir en el mundo exterior el producto de la cognición por medio de los movimientos que denominamos la conducta.

Las neuronas emergieron con el fin de facilitar y organizar la complejidad creciente de las transformaciones sensomotoras. ¿Pero cómo lo hacen? ¿Cómo funciona una neurona?

Una neurona es entre otras cosas una pila eléctrica y, como tal, genera un voltaje (figura 4.4) conocido como el "potencial de membrana". La separación de especies iónicas (átomos con cargas positivas y negativas, como el sodio y el potasio, así como grandes moléculas impermeables con carga eléctrica) entre el interior y en el exterior de la neurona determina y mantiene la diferencia de voltaje.

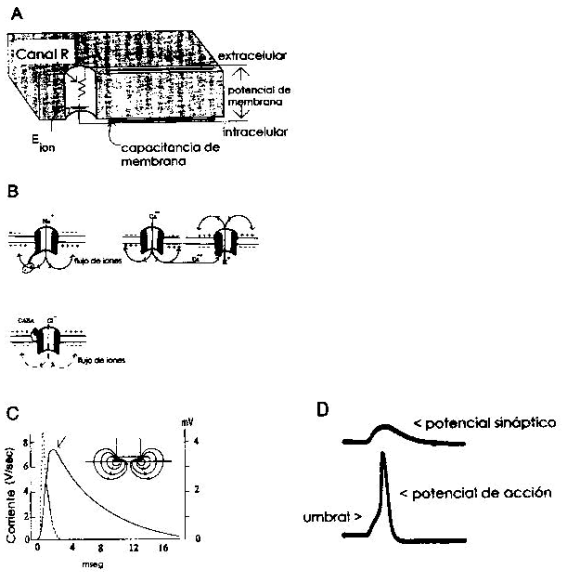


Figura 4.4

Propiedades básicas de membrana de células excitables tales como las neuronas y las fibras musculares. (A) La membrana puede representarse como uno balería, con una resistencia y un capacitador en paralelo. En la membrana hay canales iónicos activados por transmisores químicos o por el campo eléctrico (voltaje) transmembranal, que selectivamente dejan fluir la comente o través de la membrana. La dirección del flujo de la corriente a través de los canales, cuando éstos se encuentran abiertos, depende del potencial a través de la membrana, de la carga

de los iones permeables y del gradiente de concentración del ion entre el interior y el exterior de la célula. (B) Ejemplos de canales iónicos. Los canales de Na^+ y Ca^{2+} que se muestran, son de tipo voltaje-dependientes, mientras que los de K^+ y C^2 son activados por ligandos químicos (Ca^2* y el neurotransmisor GABA, respectivamente). (C) Ejemplo del curso temporal del desplazamiento del potencial de membrana durante un potencial excitador postsináptico (EPSP. flecha, escala mV a la derecha), el cual es producido por un pulso breve de corriente (línea punteado, escala a la izquierda). La tasa de caída del voltaje a través de la membrana depende de las propiedades resistivas y capacitivas de la membrana (D) Potencial de acción que parte del nivel "umbral" (trazo inferior), disparado por el potencial sinóptico (trozo superior}. H potencial de reposo para cada trazo es el nivel anterior al comienzo del potencial sinóptico.

La separación de cargas se debe a las grandes moléculas con carga eléctrica que no pueden atravesar la membrana celular (son impermeantes), y a la presencia de minúsculos canales en la membrana neuronal, específicos para el paso de sólo cienos iones. Mientras algunos canales siempre están abiertos, otros solamente lo están transitoriamente. Son numerosos los factores que determinan el estado individual de un canal en un momento dado, por lo cual se dice que la membrana neuronal es "semipermeable". Así mismo, las neuronas "bombean" activamente algunos iones hacia el interior y otros hacia el exterior de la célula, en contra de su gradiente electroquímico (ver más adelante); es así como se mantiene la separación de cargas entre el interior y el exterior de la membrana semipermeable (para una revisión general sobre los canales iónicos, ver Hille 1992).

Como el medio iónico es diferente en el interior y en el exterior de la célula, cuando un canal se abre, dejará pasar un tipo específico de ion. El movimiento de una partícula cargada (en este caso, a través del canal) crea una corriente eléctrica; por ejemplo, el término "corriente de potasio" se refiere a esa corriente eléctrica que llevan los íones de potasio a medida que se mueven a través del "canal de potasio", momentáneamente abierto. Tal corriente puede dirigirse hacia el interior o hacia el exterior de la célula, según la dirección de la "fuerza impulsora" que actúa sobre el ion, la cual está determinada por el gradiente electroquímico. Dado que las cargas eléctricas opuestas se atraen, los iones positivos buscan un medio negativo y los negativos, uno positivo (es decir, tienen mayor probabilidad de dirigirse hacia el medio positivo): tienden hacia la neutralidad eléctrica. Ésta es pues la parte eléctrica del gradiente.

Los iones tienden, además, a igualar sus concentraciones: por ejemplo, si la concentración de iones de sodio es mayor en un lado de la membrana, éstos la cruzarán e igualarán su distribución en cuanto sea posible. Me apresuro a decir que los iones no "desean" su movimiento, ya que lo único que pueden hacer es moverse por simple traslación aleatoria, también conocida como difusión. El efecto neto del movimiento aleatorio tiende a eliminar las diferencias de concentraciones entre compartimentos vecinos. Si en determinada región hay roas iones, la probabilidad de que un ion de una región con mayor concentración se dirija a una de menor concentración es mayor que la probabilidad de que los iones menos numerosos de regiones de menor concentración se trasladen hacia regiones de mayor concentración. Ésta es la parte química del gradiente. ASÍ, el impulso eléctrico y las diferencias de concentración entre el interior y el exterior de la célula se suman (el gradiente electroquímico) y determinan la dirección del flujo iónico. En fin, la permeabilidad determina que haya o no flujo iónico a través de la membrana celular.

Canales iónicos

Cuando el canal iónico de la membrana celular se "abre", se da vía libre al paso de determinados iones. Se dice que este canal es "permeable" a cierto tipo o tipos de iones (las especies iónicas difieren en tamaño y carga, de modo que un canal de sodio abierto no permitirá el paso de iones de potasio, ligeramente mayores); un canal cerrado es impermeable a todos los iones. La magnitud de la corriente de membrana se determina pues por la velocidad del movimiento de los iones a través de su respectivo canal (número de iones por unidad de tiempo).

Esta velocidad depende de tres variables: primera, que el canal respectivo se abra; segunda, que la especie iónica apropiada para dicho canal esté presente (esto se conoce como selectividad de canal); y tercero, que exista una fuerza impulsora sobre los iones que se moverán en la dirección de su gradiente electroquímico. Sin la fuerza impulsora que mueve los iones a través de la membrana hacia el interior o el exterior de la célula, no habrá movimiento neto de cargas y por tanto no habrá conducción de corriente.

Vemos pues que el voltaje de la membrana se debe a la separación de cargas por una membrana semipermeable con canales selectivos que sólo permiten el paso de ciertos iones en la presencia de gradientes electroquímicos. Esta membrana contiene otras proteínas conductoras (enzimas) que bombean activamente algunos iones hacia dentro y otros hacia fuera (proceso que difiere del primero ya que ocurre contra el gradiente electroquímico de la célula y, por lo tanto, requiere energía). En una célula no activada este voltaje se denomina "potencial de reposo" y es del orden de -70 milivoltios (mV) con respecto al exterior de la célula, el cual se fija arbitrariamente en O mV. Las neuronas pueden despolarizarse (hacer el potencial de reposo menos negativo). Las células también pueden hiperpolarizarse, caso en el cual la polaridad de la membrana toma valores negativos a -70 mV. Existe un valor particular de voltaje conocido como "umbral", aproximadamente alrededor de los -55 mV, en el cual ciertos canales voltaje dependientes incrustados en la membrana celular se abren durante muy corro tiempo. Al abrirse, estos canales permiten que aumente la entrada de corriente positiva al interior (reacción en cadena), lo que genera un potencial de acción: una onda de despolarización muy corta (un milésimo de segundo), cuya amplitud aumenta rápidamente hasta un máximo que se alcanza cuando la fuerza impulsora del movimiento iónico se agota. La amplitud del potencial de acción es de unos 100 mV (desde -70 mV hasta un potencial positivo de aproximadamente +30 mV con respecto al exterior) y viaja a través del axón en forma auto-regenerante.

El potencial de acción

Se dice que el potencial de acción es "todo o nada" porque, como toda explosión, o sucede o no sucede. Este comportamiento es característico de toda reacción en cadena en la cual la fuerza impulsora obliga a la reacción a ser tan amplia como sea posible. Una vez activado, el potencial de acción viaja a lo largo del axón sin cambios en su magnitud, y una vez iniciado, es difícil de detener. Este potencial de acción o "espiga" es un solitón, una onda eléctrica que viaja (como la onda del látigo) partiendo del cuerpo celular a nivel del "cono axónico", y de ahí, a lo largo del axón, hasta el "terminal axónico". Cada terminal establece contactos con otras

neuronas, formando sinapsis que son más frecuentes con las dendritas de las células blanco aunque también se dan con cualquier región de dicha célula. Las dendritas son proyecciones ramificadas, a manera de antenas, que reciben impulsos de otras neuronas. Fácilmente un "árbol" dendrítico puede tener de decenas a millares de sinapsis. Las dendritas conducen las corrientes sinápticas de entrada, positivas o negativas, a lo largo de las "ramificaciones" dendríticas hasta el "tronco" y cuerpo de la célula. Estos potenciales positivos y negativos se suman en el tiempo a través de la membrana y, si las cargas positivas exceden a las negativas de modo que la célula se despolarice hasta -55 mV, entonces la célula disparará su potencial de acción (figura 4.4 D).

No debe pensarse que el potencial de acción todo-o-nada se transmite de esta forma entre neuronas. Cuando el potencial de acción llega a los terminales axónicos de la neurona presináptica, la despolarización provoca la liberación de neurotransmisores (también por mecanismos dependientes de voltaje). Como ya se mencionó, estas moléculas especiales son mensajeros intercelulares que se difunden en el espacio comprendido entre dos células, la "hendidura sináptica" (figura 4.5) (de hecho, no hay contacto físico entre neuronas; el espacio líquido entre ellas es de aproximadamente 20 nanómetros, o sea 20 X 10^{-9} metros). Tales transmisores se unen a receptores específicos de la membrana de la neurona receptora o post-sináptica y, cuando se activan, cambian la dinámica de los canales iónicos de la membrana post-sináptica. Estos cambios alteran el flujo de iones a través de la membrana dendrítica y generan pequeñas

corrientes que, a su vez, provocan minúsculos cambios de voltaje — llamados "potenciales sinápticos" — en una área localizada de la membrana.

Potenciales sinápticos

Al contrario del potencial de acción, la magnitud de los potenciales sinápticos, también denominados potenciales graduados, varía de fracciones de milivoltio a decenas de milivoltios. Estos pequeños transcientes de voltaje son producidos por la liberación de pequeñas cantidades de neurotransmisor (cuantos) contenido en el interior de las "vesículas sinápticas" residentes en el interior de las neuronas en la vecindad de las sinapsis. Tales transcientes de voltaje se llaman potenciales miniatura (figura 4.6 arriba a la izquierda). La suma de un gran número de potenciales miniatura conforman los potenciales sinápticos, que decaen a lo largo de la membrana postsináptica, ya que no se observan a cierta distancia de la unión sináptica (figura 4.6 arriba a la derecha). Son eventos locales capaces de desencadenar reacciones en cadena, aun careciendo ellos de tales propiedades.

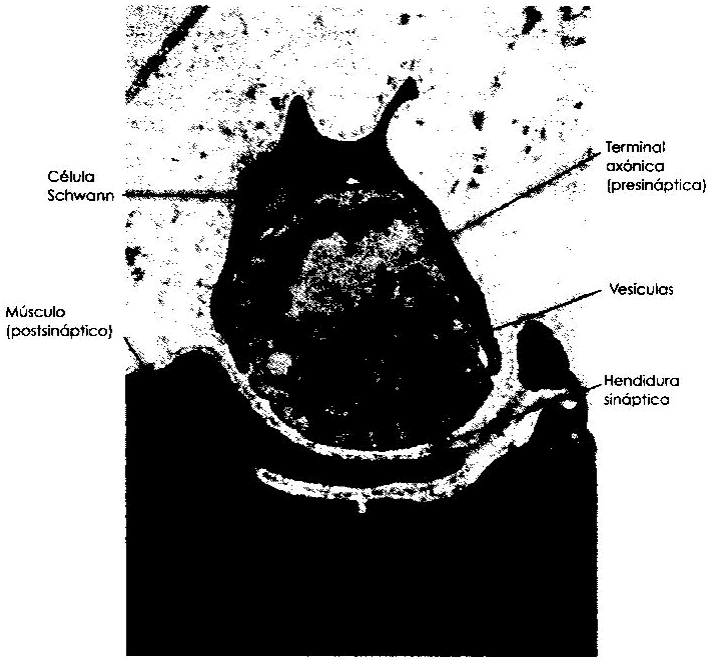


Figura 4.5

Fotografía electron-microscópica que muestra una terminal axónica de uno neurona motora que forma una unión neuromuscular sobre una fibra muscular. La terminal axónica, llamada placa motora, contiene vesículas sinópticos llenos de moléculas de neurotransmisores, las cuales liberan su contenido en el espacio comprendido entre los elementos presinápticos (axónico) y post-sinóptico (muscular) durante la transmisión sináptica. Las moléculas de los neurotransmisores difunden a través del espacio intersticial —hendidura sinóptica— y se unen a los receptores de la membrana muscular, iniciando la apertura de canales iónicos, tos cuales despolarizan lo membrana y generan un potencial sinóptico. Si éste da como resultado uno despolarización suficiente, se dispara un potencial de acción que inicia la cascada de eventos que conducen a la contracción muscular. Los puntos hexagonales que se ven en el músculo son imágenes de las miofibrillas en sección transversal, las cuates contienen tos componentes contráctiles de la fibra muscular, (Generosamente cedido por el doctor T. Reese.)

A pesar de la amplitud reducida de los potenciales sinápticos individuales, éstos se suman y producen potenciales más amplios. Si en un breve período se dan suficientes eventos de esta naturaleza, pueden despolarizar la célula a -55 mV, desencadenando entonces el potencial de acción de la célula receptora (figura 4.6 A).

En su comienzo, el potencial de acción se transfiere eléctricamente, posteriormente,

durante la transmisión sináptica, la transferencia es química y vuelve a ser eléctrica cuando se genera el siguiente potencial de acción. Por esto, la comunicación neuronal se denomina "acople electroquímico" o "señalización electroquímica".

Acople electrotónico

En el capítulo 2 ya se habló de los acoples electrotónicos y de cómo esta forma de comunicación neuronal permite, por ejemplo, que el núcleo de la oliva inferior oscile en fase como un solo conjunto de neuronas. En total contraste con la sinapsis química, en la cual el espacio de difusión entre las neuronas o hendidura sináptica es del orden de 20 nanómetros, las neuronas que establecen conexiones electrónicas están unidas mucho más Íntimamente y generan puentes entre ellas.

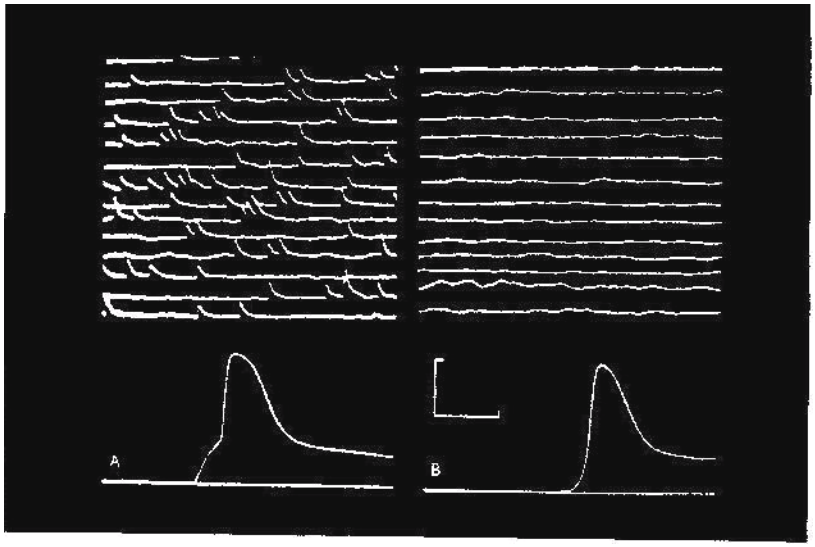


Figura 4.6

Registros intracelulares en el interior de una fibra muscular, cerca (izquierda) y lejos (derecha; de una unión neuromuscular. (Arriba) Registro de potenciales sinópticos espontáneos (potenciales sinópticos excitadores tipo miniatura, MEPS) que representan lo liberación de neurotransmisor de una sola vesícula sinóptica de la terminal nerviosa. A lo derecha no se registran potenciales sinópticos miniatura o causo de lo ubicación lejana del electrodo en relación con el sitio de la sinopsis. Los potenciales sinópticos sólo pueden registrarse cerca al sitio de la sinopsis debido a que decrementan en amplitud a medida que se distancian de su sitio de origen. (Abajo) Registro de un potencial sinóptico y del potencial de acción que produce, cerca (izquierda) y lejos (derecha) del sitio de la sinapsis- A lo derecha el potencial sinóptico que precede al potencial de acción en la figura de la izquierda no se "e, debido que el electrodo de registro se localiza lejos del sitio de origen del potencial sinóptico. El potencial de acción es registrado en la derecha porque se propago regenerativamente a lo largo de la membrana hasta el sitio donde se encuentra el electrodo de registro. Ver el texto para más detalles. (De Fatt and Katz, 1952.)

Tales puentes eléctricos conductivos se conocen como uniones comunicantes (Bennett 1997, 2000), y son capaces de establecer uniones eléctricas directas entre dos o más neuronas. Estas uniones puente consisten de canales iónicos transcelulares que unen el interior de las células y permiten la conducción directa de iones (corriente eléctrica) entre células así acoplados. AI inyectar una tinción fluorescente en neuronas así conectadas, la tinción pasará libremente a través de los puentes y por ende a las diversas células que conforman la unión. Como el flujo electrorónico no involucra neurotransmisores, casi no hay retraso en los cambios de voltaje provocados por el paso de electricidad entre células. El proceso electroquímico de señalización conlleva un breve retraso debido a los pasos implicados en la liberación del transmisor, al tiempo de difusión a través de la hendidura, al posterior acople del transmisor y finalmente a la

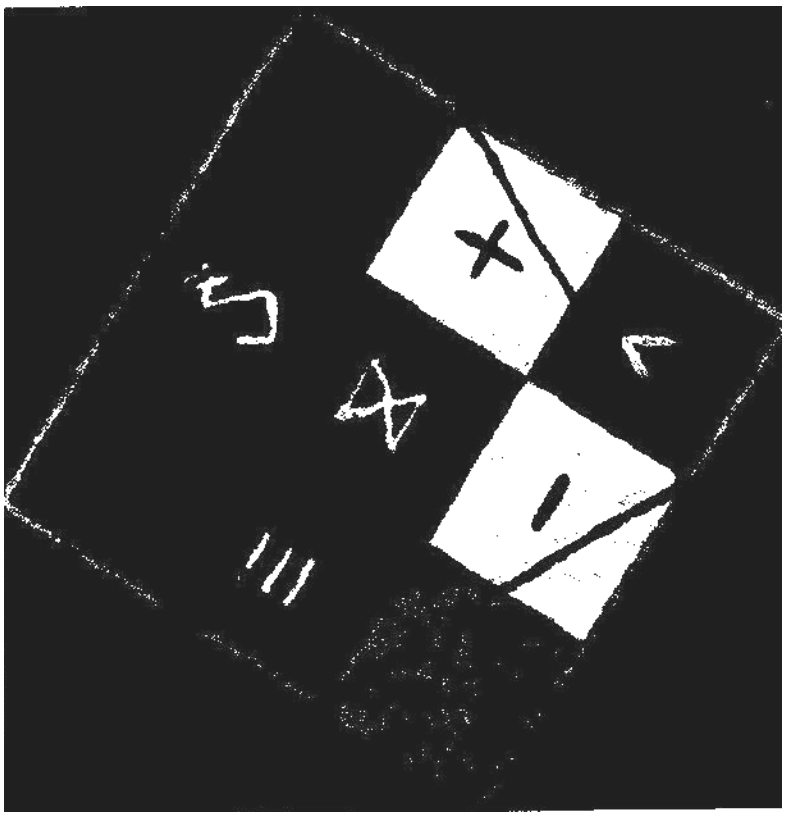
activación de los canales iónicos del área local de la membrana que permite el flujo de corriente hacia dentro y hacia mera. Todo lo anterior toma de 1 a 2 milisegundos. En cambio, en el caso de la conectividad electrotónica, el flujo de iones se realiza, como ya se explicó, a través de canales ya abiertos que permiten que la corriente pase directamente de una a otra célula. Por tanto, cuando una neurona dispara un potencial de acción, cualquier otra célula acoplada electrotónicamente a la primera, por fuerza recibirá parte de la señal casi simultáneamente. Si la señal es suficientemente amplia, a su vez hará que células acopladas disparen potenciales de acción.

¿Es este flujo eléctrico bidireccional? Resulta que muchas uniones íntimas regulan el flujo de corriente en forma uniforme, bidireccional (Bennett 2000), cosa que se observa en las conexiones eléctricas de la oliva inferior (01) y que les permite funcionar eléctricamente casi como si fueran una gran célula (ver la revisión de Welsch y Llinás 1997). Pero no rodas las uniones Íntimas operan bidireccionalmente, y algunas de ellas sólo permiten el flujo de corriente iónica en una dirección; en este caso, envían simultáneamente su señal a la siguiente neurona, pero no reciben señales de ella (ver Furshpan y Potter 1959).

Por tanto, este flujo de corriente directo entre células, producido por el acople electrotónico, resulta en disparos rápidos y sincrónicos de células interconectadas. Así ocurre la señalización "de conjunto” que permite que ciertos grupos de neuronas transmitan patrones concisos y sincrónicos de señales a neuronas muy dispersas y quizás muy distantes. En el caso del acople eléctrico, muchas células disparan a la vez, lo que le imprime a la señal algo más semejante a la "voz de las masas" que a la "voz solitaria en el bosque" de una célula aislada. Es una ejecución en coro por oposición al solo de una voz. El acople temporal se relaciona también con la solución de continuidad que percibimos en la consciencia.

El acople electrotónico desempeña un papel importante en los procesos de desarrollo. En el capítulo 3 vimos que la señalización simultánea en el estadio miogénico permite que la motricidad rítmica de los músculos se interiorice en una función de resonancia oscilatoria intrínseca al cerebro. Durante el desarrollo, tal acople también aprovecha el diámetro relativamente grande de las uniones puente (Bennett 2000). Las uniones conductoras permiten el flujo no sólo de iones, sino de moléculas relativamente grandes que desempeñan importantes funciones internas de regulación y desarrollo celular pero que, por su tamaño, podrían tener dificultades para penetrar en las células. El diámetro de estas uniones puente es de aproximadamente 1.5 nm, lo cual permite el paso entre neuronas de pequeños péptidos, así como de moléculas críticas como la ádenosina monofosfato cíclica (AMPc) (ver Simpson et al, 1977; Pitts y Sims 1977; Kam et al., 1999). Bevans et al, 1998). Las moléculas de gran tamaño no pueden penetrar en las células a través de los canales iónicos de la membrana celular, pues éstos son demasiado pequeños. Esto podría considerarse como una forma de simultaneidad reguladora entre neuronas en desarrollo.

Así pues, la unidad funcional básica de la neurona es eléctrica y sus interacciones electrotónicas y potenciales de acción sirven de unión temporal, lo que le confiere a la neurona su columna vertebral integrativa. Por otro lado, la transmisión sináptica química y la eléctrica conforman la "moneda básica" que integra sus diversos-elementos en estados funcionales multicelulares unitarios.



Alfred Jensen. Comienzo de cuadrado - final cíclico, Per I-V, 1960. Lienzo al óleo, 127 cm. x 635 cm. en total; 5 paneles de 127 cm. x 127 cm. cada uno:
panel 4. Cortesía de Pace Wildenslein. Fotografía de Ellen Page Wilson.

5
Lo que nos enseña la evolución del ojo

La invención de los órganos sensoriales

¿Cuál es el impulso evolutivo que genera la vida y los animales? ¿Cómo se generó la espectacular y compleja arquitectura celular que es un animal? ¿Que puede decirse de los diferentes órganos y de su gran diversidad de formas y funciones? Desde la perspectiva de la división fisiológica del trabajo, los órganos suelen considerarse como componentes del cuerpo con funciones tan especializadas que a menudo resultan sorprendentes. En su mayoría tales funciones son vitales para el organismo en su totalidad, para la vida del individuo (corto plazo) y para la superviviencia de la especie (largo plazo). El corazón, los ojos, el hígado, son módulos funcionales, y al mismo tiempo tienen individualidad y localización. Por muchas razones, tales órganos, como el cerebro mismo, pueden considerarse como sociedades especializadas, cerradas dentro del animal. Pero, a pesar de las numerosas semejanzas, hay además enormes diferencias entre tales órganos. El cerebro es básicamente cerrado en su naturaleza y operación, escapa completamente al examen directo de los sentidos, no lo vemos ni oímos, no lo sentimos palpitar, no se mueve en ninguna dirección, no siente dolor si lo golpeamos. Más aún, parece muy distante de su asiento corporal — como cuando nos compadecemos del dolor ajeno u observamos admirados el universo.

Este sistema orgánico cerrado que llamamos cerebro tiene además la ventaja de no estar limitado por las propiedades de los sentidos. Consideremos que el estado de vigilia sea un estado de ensoñación (igual a como los sueños son estados análogos a la vigilia), guiado y conformado por los sentidos, al contrario de los sueños normales que presciden por completo de los sentidos. El cerebro utiliza los senados para apropiarse de la riqueza del mundo pero no se limita a ellos;

es capaz de funcionar sin ningún tipo de entrada sensorial. La naturaleza y función del cerebro hace del sistema nervioso una entidad muy diferente de las del resto del universo. Ya se dijo que, en realidad, es un emulador. Si aceptamos que se trata de un sistema cerrado y único, ello implica que es una forma diferente de expresar "todo". En otras palabras, la actividad cerebrales una metáfora para todo lo demás. Tranquilizante o no, el hecho es que somos básicamente máquinas de soñar que construyen modelos virtuales del mundo real. Probablemente es lo máximo que se logra con soto un kilo y medio de masa y un "tenue" poder de consumo de 14 vatios (Erecinska y Silver 1994).

Lo más sorprendente, quizás, es que esta arquitectura funcional única y específica, este sistema celular cerrado, ¡se forma sin saber, a priori, lo que su función ha de ser! ¿Cómo es esto posible? Ésta es una de las verdades profundas de la evolución, que el cerebro comparte con los demás órganos. Las estructuras complejas y únicas de todos ellos desarrollaron funciones específicas y poderosas sin un plan final a priori. "Pero ¡un momento! ¿Qué hay de la genética y del plan de desarrollo preprogramado del DNA?", cabe preguntarse. Es claro que la genética entra en Juego aquí, pero sólo como el cúmulo de la narración de una gran epopeya por parte de cada generación, narración sin argumento y ciertamente sin final. Hay muchos personajes, un "bang" al comienzo, pero después solamente vienen giros y volteretas y un estado intermedio sin fin. Todo esto parece un tanto curioso.

¿Cómo comprender el proceso por el cual nos llegó el sistema nervioso, la mente, si su historia ancestral evolucionó sin brújula o mapas? En realidad, los demás órganos (y los animales en que habitan) también se desarrollaron por ensayo y error, en un proceso que no tiene fin.

Para desarrollar el sistema nervioso, la naturaleza tuvo que apropiarse ciertas propiedades del universo externo, aprovechándolas e incorporándolas en sus circuitos. En el capítulo 3 se discutió el punto fundamental de la integración. Es tiempo ahora de preguntarnos cuál fue el primer paso de este proceso. ¿Cómo asimilamos las propiedades fraccionadas del mundo externo y las contextualizamos en un todo unitario? La evolución tuvo que "inventar" los órganos sensoriales, mecanismos especializados de relevo entre los "universales" y el sistema inherentemente cerrado que es el cerebro. Si se comprende el relevo sensorial o proceso de transformación momentáneo, se facilita entender lo que significa la "asimilación" de las propiedades externas. Por momentáneo se entiende, por ejemplo, la internalización, ahora mismo, del contenido de esta frase al leer este libro. Entendamos que al leer los patrones de luz que conforman las presentes palabras son traducidos por el sistema visual y terminan, por intermedio de otros sistemas cerebrales, resonando como una voz en la cabeza del lector. Desenvolviéndose a través de cientos de millones de años, el sistema internaliza y "recuerda" genéticamente. ¿Cuál es el resultado? Los fotorreceptores primitivos que detectan la luz evolucionaron con Otros sistemas ectodérmicos (la piel) y formaron órganos tan maravillosos como nuestros ojos. De igual modo, el estatocisto primitivo, que alguna vez fue (y todavía es) el mecanismo rudimentario de equilibrio del tunicado marino, evolucionó en ese subsistema cerebral enormemente importante conocido como el aparato vestibular. Los sistemas sensoriales evolucionaron como herramientas cerebrales extremadamente sofisticadas, perfeccionadas por el tiempo para aumentar y afinar incesantemente la eficiencia del movimiento anticipatorio y, por ende, de la supervivencia.

Aunque es cierto que nuestras descripciones se inclinan hacia los órganos sensoriales, podría no ser así. El aprendizaje basado en la internalización de las propiedades universales del mundo externo impulsó la formación de todos los órganos, desde las manos y los pies hasta las colas y plumas. Los órganos sensoriales ilustran más claramente lo anterior porque son las vías directas de acceso del mundo externo al mundo interno, y porque el cerebro es el foco de atracción de este libro. Por ejemplo, el hígado evolucionó bajo iguales principios de presión evolutiva aunque en forma algo menos directa pues su misión era liberarnos de toxinas ingeridas inadvertidamente (a veces a sabiendas, como en la atracción por el vino). Sin embargo, la toxicidad es un concepto eminentemente relativo según la especie; no es un universal. Lo que

nos lleva al borde de la muerte, puede ser un suculento pasabocas para una rata o la dieta rutinaria de un buitre. Al hablar de propiedades universales o de universales, me refiero a aquellas propiedades constantes que se originan en el mundo externo en toda forma de vida-Por ejemplo, las ondas luminosas tienen propiedades universales, como las tiene la temperatura o la fuerza de la gravedad. Éstos se cuentan entre los fenómenos más primordiales y poderosos con los cuales se confrontó la vida y que, por ende, terminaron conformándola. Pero ¿cómo es posible comprender todo lo anterior? Pensemos en alguna fundón — ver — y en un conjunto de órganos — los ojos y su cerebro.

¿Por qué los ojos?

Dada mi inclinación ya conocida por tos órganos sensoriales, en este capitulo tomaré los ojos como ejemplo central, en razón de la variedad de formas que han evolucionado para transducir (convertir) la luz en una especificación útil de estados cerebrales internos. Siempre, y esto es general para todos los sentidos, el cerebro sólo acepta las propiedades específicas del mundo externo que estimulan los órganos sensoriales (no podemos detectar directamente las ondas de radio o las ondas electromagnéticas de la televisión) y la transmisión de estos "mensajes" se realiza por medio de la actividad eléctrica neuronal, como el único sistema posible (no hay telepatía, y si no lo cree, ¿para qué tiene teléfono?).

Entonces, en ¿qué consiste la visión?

¿Qué significa "ver"? ¿Por qué es el aparato visual como es y que nos enseña acerca del cerebro — de la mente? (Para un excelente resumen de la visión, consultar a Zeki 1993.)

El ojo (figura 5.1A), y en particular la retina (la parte sensible a la luz), es una extensión del sistema nervioso central (figura 5.1B). Las neuronas de la retina forman un circuito extraordinariamente compacto y bello que envía mensajes eléctricos interpretados por el cerebro como luz. En el capítulo 4 se aclaró que no son solamente las propiedades de conjunto las que dan lugar al comportamiento y función única de determinado circuito; es la arquitectura del conjunto la que le confiere al circuito sus propiedades macroscópicas (como en el caso del corazón), su contexto e intencionalidad. Tales arquitecturas o módulos en general se componen de diversos tipos de neuronas con propiedades intrínsecas eléctricas diferentes. Algunas son excitadoras y otras inhibidoras. En el caso del ojo, la retina suministra un excelente ejemplo de tal estrategia. Examinemos pues la evolución del ojo, nuestro ojo, así como la de otros ojos igualmente fascinantes.

Todo comería cuando los organismos aprovecharon la energía solar, que es absolutamente esencial para la vida. Estamos en la tierra por cortesía del reino vegetal, el primer grupo adorador del sol. Las plantas y los árboles y las algas verdes evolucionaron por vía directa convirtiendo la energía luminosa/solar en alimento —

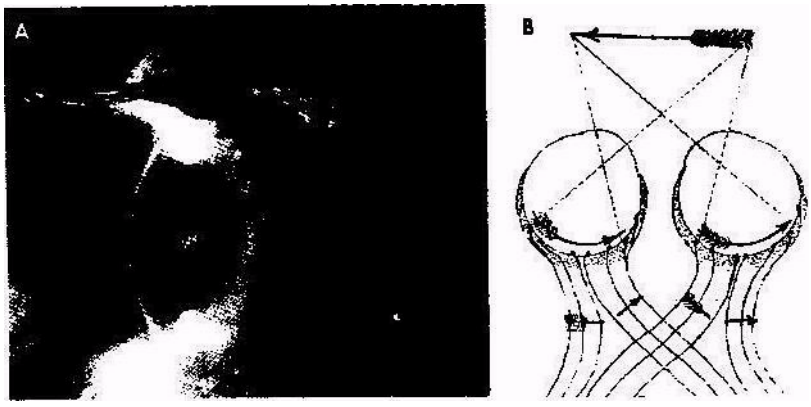


Figura 5.1

(A) Fotografía del perfil del ojo humano. La luz entra al ojo por la córnea transparente, en donde ocurre lo mayor parte de la curvatura de lo luz. E] punto blanco en la pupila es un reflejo de luz. (Tomado de Hubel. 1988, p.35,) (B) Diagrama simplificado de la organización de la

retina. (Tomado de Cajal, 1911.figuro 571.)

mediante la llamada fotosíntesis. La fotosíntesis es et procedimiento molecular mediante et cual las plantas sintetizan carbohidratos, proteínas y grasas. Así pues, plantas, árboles y algas verdes generan ^u propio alimento, solución ésta muy inteligente. Por el contrario, los animales son más siniestros. Convienen la energía luminosa en señalizaciones neuronales que les permiten "ver", y entonces se comen las plantas (o se comen entre sí, como cuando nosotros comemos carne azada, o el tiburón se come a un humano).

¿Por qué no "ven" las plantas y las algas verdes? Como ya se señaló, esto se debe a que no se mueven voluntariamente; o por lo menos no lo hacen a velocidades que les permitan competir con los animales. Fabrican su propia comida y se reproducen ya sea dispersando sus semillas al aire o al agua, por polimación cruzada, o por división- Su estrategia de sobrevivencia es efectiva sin necesidad de moverse activamente. Las plantas mantienen a distancia a los predadores mediante espinas y repelentes químicos. Dados los, predadores que acechan a las plantas y a los árboles, la capacidad de moverse activamente probablemente no les ayudaría mucho. Los parásitos invaden el organismo, las langostas y los pájaros carpinteros vuelan y, además, es dudoso que si un árbol tuviera la habilidad de volar o de moverse, lo pudiera hacer más rápido que sus predatores.

Así pues, los árboles no corren o vuelan y no se pueden defender como un boxeador, a "ramalazo limpio". En el reino vegetal, lo más parecido al movimiento sería el fototropismo, la tendencia de formas de vida fotofilicas a inclinarse o a dirigirse hacia la luz, como en el caso de las algas. Las plantas no se mueven activamente y no necesitan cerebro: su sobrevivencia no depende de la anticipación.

En cuanto a las criaturas con movimiento activo, la "telecepción" o detección a distancia como el ver, oír u oler amplia la capacidad anticipatoria del animal en su interacción con el mundo. Es mejor poder ver que se acerca una amenaza, que tocarla, probarla u olería. De hecho, ante un predador al acecho, las sensaciones táctiles de olfato o de gusto indican cuando éste ya está demasiado próximo. En nuestro caso, demasiado próximo en general significa demasiado tarde (piense en el tiburón).

Las capacidad de predicción que da origen a la visión comienza con la habilidad de criaturas muy primitivas de detectar la luz. En el mar, siempre fue ventajoso saber dónde quedaba la superficie y dónde el abismo. Las formas terrestres buscan seguridad en la oscuridad, como lo sabe quien ve desaparecer a la cucaracha entre la madera cuando a media noche enciende la luz en busca de la nevera. Es más fácil esconderse en la oscuridad que en la luz. Originalmente, detectar luz no se relacionó con la visión; sencillamente se trataba de detectar si había o no luz, lo que se traducía, dependiendo del animal, en aumento o disminución del movimiento. En ese estadio, la capacidad de detectar la dirección de la fuente luminosa requería un órgano que aún estaba por evolucionar. Para comprender cómo las capacidades de un órgano de detectar luz se transformaron en detección de la dirección de la fuente luminosa, debemos examinar el proceso mismo de fototransducción.

La luz es un conjunto de eventos/objetos llamados fotones. Todavía se debate si los fotones son panículas que se comportan como ondas u ondas que se comportan como partículas (o ni lo uno ni lo otro). Fisiológicamente, la luz se comporta como paquetes de energía (cuantos) que activan receptores especializados. Tanto la cantidad de luz como la longitud de onda (que se detecta como color en nuestro caso) son importantes en la fisiología del ojo.

Todas las ondas electromagnéticas en general, y entre ellas la luz, viajan en línea recta a una velocidad alrededor de 300.000 kilómetros/segundo. Como los fotones interactúan entre sí y se refuerzan o se cancelan (ver la "Suma Sobre Historias" de Richard Feynman en Feynman y Hibbs, 1965), incluso si la luz reflejada continúa su trayectoria rectilineal. Además de reflejarse (como en un espejo), la luz también se refracta, es decir que cambia la dirección de su trayectoria al pasar de un medio a otro (digamos, de aire í agua o a vidrio). Una vez que cambia de rumbo, sigue en línea recta siempre que el medio no cambie o que el espacio en el que viaja no se

deforme debido a un campo gravitacional importante. El grado en el cual un medio modifica la trayectoria de la luz se conoce como su "índice refractivo", que será tanto mayor cuanto mayor sea el grado de curvatura.

Así pues, dado que la luz rebota de los objetos a los que llega (reflexión) o los atraviesa (translucidez con o sin refracción) o el objeto absorbe la luz (un objeto negro), la luz informa acerca de las propiedades ópticas del universo que nos rodea. El hecho de que la luz viaje en línea recta es importante porque significa que es fácil detectar su fuente. Su trayectoria directa y su abundancia fueron hechos esenciales en la evolución de la visión pues permitieron que los fotones que llegaban al ojo actuaran como mensajeros precisos y fieles del remoto paisaje del mundo externo.

Los fotones se "captan o absorben" mediante materia pigmentada. O mejor, la materia es pigmentada (tiene color) cuando absorbe determinados fotones. Los pigmentos dan color a las cosas, como veremos. Ya mencionamos que los fotones tienen diversas longitudes de onda. Un haz de luz es de carácter sinusoidal, como ondas en el agua, con pequeñas distancias entre sus cimas (o entre sus depresiones), lo que se conoce como longitud de onda. Nuestro rango de visión de colores, llamado el espectro visual, abarca longitudes de onda del orden de cientos de nanómetros (nms) o 10^{-9} metros. Por ejemplo, el rango de lo que vemos como luz azul es de unos 420-nm y la longitud de onda del rojo es superior a los 550-nm.

En cuanto a la frecuencia de la luz, ésta se relaciona inversamente con su longitud de onda: a mayor longitud de onda, menor la frecuencia, la cual representa el número de ciclos individuales de onda por segundo. Es lógico que a mayor espado entre las cimas, mayor será la longitud de onda y menos ciclos de onda pasarán por un sitio dado en un segundo, por lo que la frecuencia será menor. La frecuencia es una propiedad diferente de la velocidad de conducción, y para lo que nos concierne, la velocidad de la luz no cambia. Es una constante.

La luz del sol es una mezcla de todas las frecuencias de luz del espectro de colores. Entonces, en el caso del libro azul del colega que veo frente a mí ¿es el azul del libro el que absorbe la luz azul, o es mi ojo? Respuesta, el ojo capta la luz azul y el libro captó todas las frecuencias de color pero no las azules. Es decir, la luz de una frecuencia dada (420 nm), que llamamos azul, rebota del libro en línea recta y los fotones de esta frecuencia llegan a mi ojo. Sin embargo, téngase en cuenta que el azul no existe como tal en el mundo externo y que tal sensación sólo es una interpretación que hace el cerebro sin el cual los colores no existen.

¿Cómo logra mi ojo captar luz y, además, indicarle al cerebro de qué frecuencia se trata? Los fotones son absorbidos por neuronas llamadas fotorreceptores, en las cuales existe un tipo de proteínas muy antiguas llamadas opsinas, que forman parte del pigmento visual- Estas opsinas interactúan íntimamente con una segunda molécula llamada cromatóforo (que en realidad absorbe los fotones) activando la célula receptora con la llegada de la luz- En el caso del

libro de mi colega, como la mayoría de fotones que rebotan tienen una longitud de onda de 429 nm, mayor será la proporción de fotorreceptores de azul activados.

Volvamos a nuestro organismo primitivo que absorbe fotones utilizando fotorreceptores localizados en un parche de piel fotosensible, pero no genera imágenes.

Detección de fotones y dirección de lo luz

La neurona fotorreceptora determina la intensidad de la luz "contando" los fotones captados. Por cada fotón absorbido, el potencial de membrana del fotorreceptor cambia levemente, de modo que la luz se mide en incrementos de potenciales de membrana. De hecho, los humanos podemos detectar cambios hasta de un solo fotón (Hubel 1988). La actividad eléctrica de fotorreceptores que cuentan fotones representa la magnitud de la luz recibida. Los cambios en el conreo del fotorreceptor corresponden a fluctuaciones de la fuente luminosa (una sombra, un predador). Tenemos ya un organismo primitivo con un parche de piel fotosensible o "mancha ocular".

La capacidad de detectar el día o la noche y quizás el que la luz indicara calor, ciertamente

fue útil para la sobrevivencia. ¿Pero es posible mejorar esto? ¿Cómo atrapar la luz más eficientemente? Como ya mencionamos, el parche de piel fotosensible compuesto por células ciliadas ectodérmicas con unos 100 fotorreceptores (Land y Fernaid 1992) es incapaz de generar imágenes de lo que hay afuera. A medida que el área de este "parche" de fotorrecepción se amplía, naturalmente tiende a adoptar una forma cóncava (deprimida). En ese caso, si la luz llega directamente desde el frente, la parte posterior de la concavidad se activa. Y así, cuando llega desde cualquier ángulo, la luz activará la depresión asimétricamente, dando lugar a rudimentos de direccionalidad que permiten, a lo sumo, diferenciar arriba y abajo, atrás y adelante y tal vez derecha e izquierda. Muchos de estos ojos cóncavos en realidad sólo responden a cambios muy rápidos de luz (sombras en movimiento).

En el paso evolutivo siguiente, el área del parche cóncavo se amplió y su apertura se redujo, convirtiéndose en una cavidad esférica y envolviéndose sobre sí misma. Esto dio lugar a lo que conocemos como "ojo en caverna". Por último, la concavidad se cerró completamente, excepto por un pequeño agujero, y esto dio lugar al "ojo estenopeico" en el cual el pequeño orificio sirve de lente. En este caso, la imagen real del mundo se proyecta en forma invertida sobre la superficie fotorreceptiva. Con la evolución del lente y la cornea en forma de epitelios transparentes la evolución óptica logró una mejor imagen (Ali 1984) (figura 5.2).

Algunos ojos son extraños

Entramos ahora en un dominio en el cual la verdad es más extraña que la ficción. Mis amigos Enrico Nasi y María del Pilar Gómez trabajan en los veranos en el Laboratorio de Biología Marina de Woodshole, son expertos en fotorrecepción y estudian los ojos de las vieiras. En el contacto entre sus dos conchas, estos deliciosos moluscos tienen numerosos y bellísimos ojos azules esféricos que miran en todas las direcciones y que, como supe por Enrico y María, son muy extraños. Nuestra retina se halla en el fondo de la concavidad ocular. En cambio, las vieiras tienen dos retinas que cuelgan verticalmente adheridas a la superficie interna del globo ocular, como una pantalla de proyección que divide la concavidad del ojo en una mirad anterior y una posterior. Estas retinas, dispuestas como dos pieles de tambor paralelas, están organizadas de tal modo que la retina delantera mide la intensidad de la luz. La luz atraviesa esta retina e impacta la parte posterior del ojo ¡que es una superficie en espejo! (como en un telescopio newtoniano). Al llegar al espejo, la luz se refleja en la retina posterior, la cual recibe la imagen proyectada por el espejo posterior. Los mensajes de ambas retinas se transmiten por el nervio óptico cuya salida se encuentra en el ecuador de la excavación (siendo los polos norte y sur, respectivamente, la parte anterior y posterior del ojo) (figura 5.3).

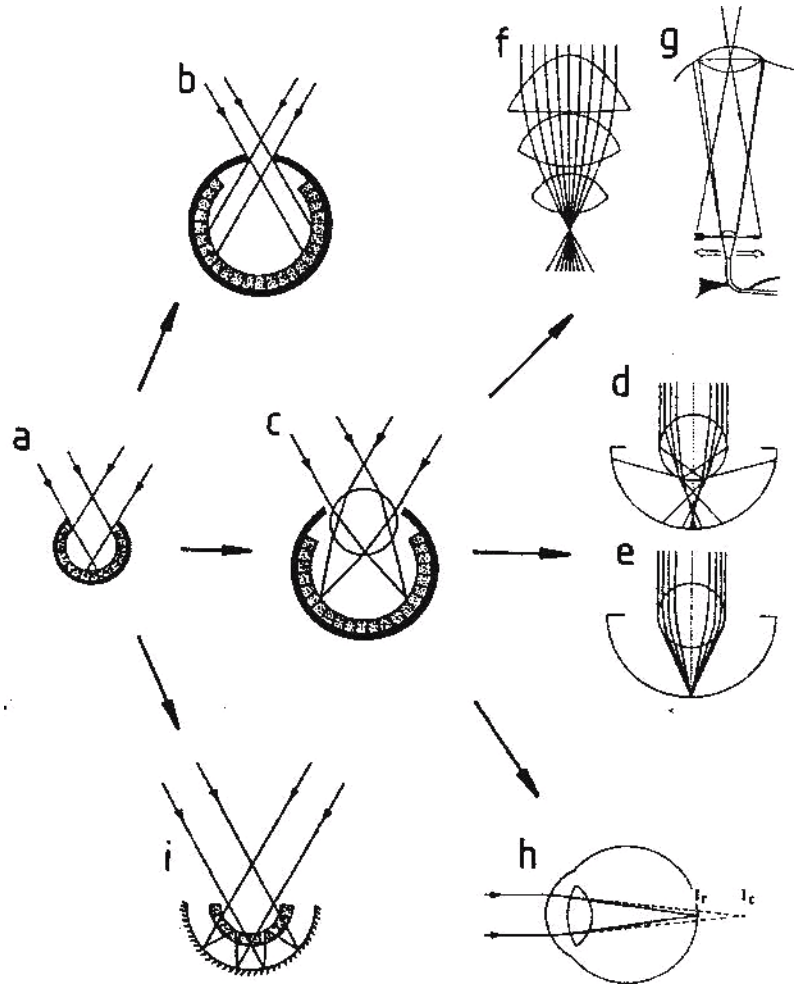


Figura 5.2

Evolución de un ojo unicameral. Las flechas indican líneas de desarrollo, más .que secuencias especificas evolutivos, (a) Concavidad ocular (b) Ojo con orificio del nautilo (c) Ojo con tenle (d) Lente homogéneo (e) Lente no homogéneo, "de Mathiesen" (f) Lente múltiple de un Pontella masculina, (g) Ojo bilentícular de uno Copilia (ver figura 5,4), La flecha sólida indica la posición de la imagen y la flecha delineada, el movimiento de barrido del segundo lente. (h)Ojo humano con córnea y lente. (h) imagen formado sólo por la cornea la imagen final en la retina, (i) Ojo en espejo de vieira Pecten. (Tomado de Land y Fernald.. 1992, figura 1, p.6.)

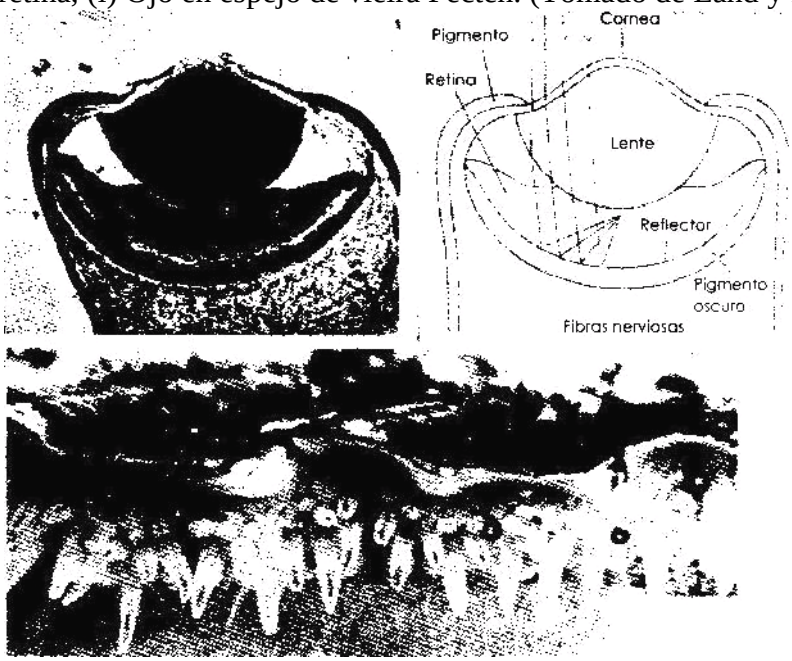


Figura 5.3

Ojo de vieira. (Arriba) Sección transversal de un ojo de vieira que muestra que, al contrario del ojo vertebrado que tiene una clara zona entre el lente y lo retina a través de la cual se enfocan los rayos de luz, su lente está en contacto con lo retina en forma de creciente. El delgadísimo espejo (que no se visualizo con la magnificación presente) y lo capa gruesa de pigmento oscuro se encuentran detrás de la retina. A la derecha, diagrama con la trayectoria de lo luz que llega al ojo. La luz débilmente refractada por el lente atraviesa la retina y llego al reflector hemisférico que la re-enfoca .en las células fotorreceptoras de la capa superior de la retina. Como la luz ya ha atravesado una vez la retina antes de ser detectada, la agudeza de contraste de la vieira es pobre. {Abajo) Los ojos de la vieira Pecten se ven en esta fotografió como pequeños glóbulos (resaltados en círculos) o lo largo del manto del molusco expuesto por la obertura de los dos conchas. Cada ojo cuyo diámetro es de un milímetro, contiene un espejo hemisférico. Los ojos detectan el movimíento de sombras o de bordes oscuros en el campo visual del animal, lo cual le permite discernir la cercanía de un predador. Estos ojos de baja agudeza de contraste, también pueden desempeñar algún papel en la fototaxis: movimiento hacia áreas de oscuridad o de luz. (Tomado de Land 1978. pp. 127, 130.)

Más y más extraños

El ojo de otros invertebrados marinos como el del crustáceo ostracodo Gigantocypris no consiste de un lente sino de un espejo parabólico (figura 5.4). El espejo recibe la luz y la enfoca en una retina esférica, como la cabeza de un fósforo (algo así como las luces delanteras de los automóviles, donde la bombilla correspondería a la retina y en vez de emitir luz la recibe) (Lands 1980). Más increíble aún, en algunas formas marinas como los heterópodos y las arañas saltadoras, entre otros, la retina es una cinta con unos

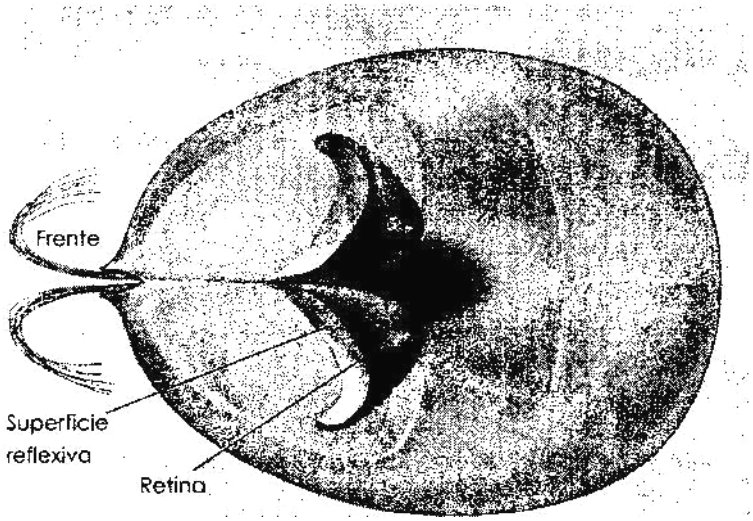


Figura 5.4

0tro ojo en espejo. El crustáceo de aguas profundas Gigantocypris tiene ojos reflectores de gran tamaño que le permiten concentrarse en débiles haces de luz a I 000 metros de profundidad en el mar (y que provienen en su mayoría de crustáceos y peces luminiscentes). La cabeza de este crustáceo mide aproximadamente un centímetro de longitud, más o menos la mitad del cuerpo. Los dos ojos reflectores están cubiertos por ventanas transparentes en la caparazón naranja que recubre todo el animal. Sir Alister Hardy, de la Universidad de Oxford, comparó este ojo con los "loros de un automóvil grande". Hardy fue el primero en especular que los espejos servían para enfocar lo luz. (Tomado de Land. 1978, p.131.)

pocos receptores a lo ancho y cientos de receptores a lo largo; el ojo barre el campo visual inclinando la retina en un arco de 90° (Lands y Fernaid 1992). Sin embargo, el más raro de los

ojos es el de la (Copilia. invertebrado marino del Mediterráneo, que se encuentra cerca de la bahía de Nápoles (figura 5.5). Este organismo tiene un lente transparente inmóvil incrustado directamente sobre la cabeza (como la ventana de un avión). Dentro de la cabeza hay un segundo lente movedizo y unos pocos fotorreceptores que, en con junto, barren el horizonte cinco veces por segundo, algo semejante al barrido de la televisión.

¿Qué nos dice todo lo anterior? Indica que una superficie que Originalmente sólo absorbía luz, puede evolucionar en formas intermedias incapaces aún de hacer imágenes ¡hasta llegar a una forma que si las puede conformar! El pequeño parche de piel se convirtió en un módulo funcional altamente especializado: se convirtió en un órgano, el ojo.

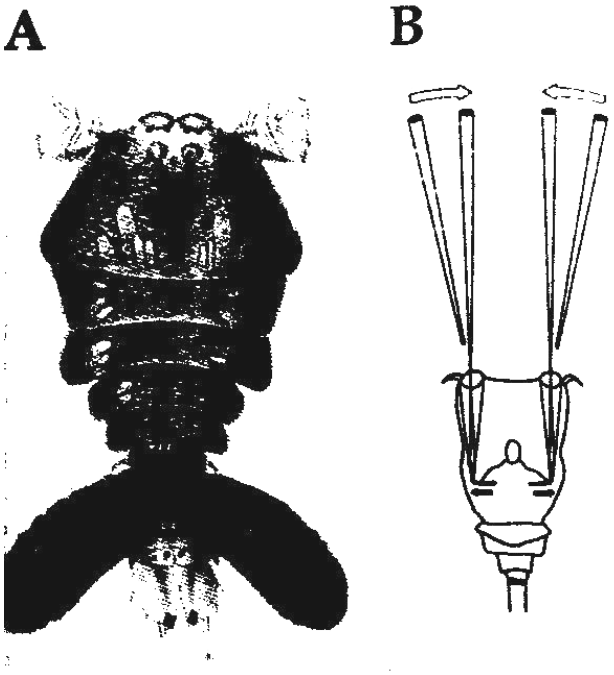


Figura 5.5

(Izquierda) Copepoda Copilia (Derecha) Diagrama de los ojos. Las retinas tienden sólo 3 grados de arco y borren un total de 14 grados de arco. (el sitio Web nmnhwww.si.edu/iz/copepod/_borders/)

De las células emanan los sistemas

Así pues, la complejidad de los sistemas emerge de la complejidad inherente a las células, y ello sin conocimiento a priori de lo que podrían ser al final, si es que lo hay. Se trata de propiedades emergentes; los sistemas no son todo o nada, sino que evolucionan. Sin embargo, por su increíble complejidad, intuitivamente parecería que algo, algún polo de atracción, algún proceso, guíe la transformación del ojo en lo que es. Pero esto es justamente lo que no sucede. No hay intención de convertirse en ojo y en los albores de la visión, se intentaron una enorme variedad de posibles soluciones. El sistema no sabía hacer retinas planas o lentes de Galileo; simplemente mutaciones genéticas hacen cambios paulatinos que ofrecen alguna ventaja y hacen al animal más competitivo o de lo contrario se lo comen o se muere de hambre. ¿Qué tienen en común todas estas soluciones? Todas ellas explotan las propiedades de la luz a saber, su trayectoria en línea recta y la generación de imágenes por reflexión o refracción. Si se comprende esto se comprenderá cualquier sistema visual periférico concebible, aquí o en otro planeta.

¿Cómo demostrar que, para hacer imágenes con luz, la evolución ensayó prácticamente todo lo posible, dado sus recursos? No es posible asegurar que lo ha ensayado todo, pero

definitivamente lo suficiente para generar la misma solución final (hacer imágenes con luz) de maneras muy diferentes. En fin. Pese a que la naturaleza no planea, en ella suceden cosas espectaculares. Pasemos a otro ejemplo.

¿Cuánto cuesta una bolsa de canicas? Lo equivalente a dos dólares o dos euros. Pero como la gente necesita trabajar para vivir, probablemente el costo real de las canicas sea de centavos. ¿Cómo hacer una bola tan perfecta, tan absolutamente esférica y lisa a can bajo precio? Recordemos además que las canicas tienen bellísimos patrones. ¿Entonces cómo se hacen?

A la mayoría de la gente te vendrá a la mente la idea de la torre de munición desde la cual se vierten gotas de plomo derretido que caen al final en un líquido refrigerante. Al caer, las gotas de plomo se solidifican en fragmentos más o menos esféricos. Pero, fabricar canicas de este modo resultaría muy costoso, sería imposible incorporarles los patrones de colores deseados y, además, no serían perfectamente redondas. La solución es derretir el vidrio en forma de varilla, añadirle los patrones de colores y cortarlo en pequeños cilindros. Estos cilindros más algunas substancias abrasivas se colocan dentro de un tambor que da vueltas constantemente por semanas. Rotando así durante cierto tiempo, la mayoría quedarán perfectamente esféricas.

Esto es precisamente lo que sucede en biología durante la evolución: si se deja que algo gire durante suficiente tiempo, se acerca paulatinamente a una solución estable. En el caso de las canicas, éstas se hacen esféricas porque es la solución física que da la mínima superficie por volumen. El poder de las colisiones aleatorias se basa en lo anterior y en paciencia, y de allí deriva la suma total de la inteligencia de la naturaleza. La selección natural elimina sistemáticamente todas las asperezas, los defectos, lo que no funciona bien. Lo que permanece son los aspectos ventajosos que se transmiten de generación a generación, es decir, *lo que funciona, lo que facilita la sobrevivencia. De hecho, la sobrevivencia es el combustible de la selección natural.*

Pero en contra de esta sencilla perspectiva, el hecho es que, en biología, por más vueltas que se den, nunca se logra la perfección.

¿Qué quiere decir "perfecto" en biología? Significa terminar un trabajo — un trabajo particular, especializado como el de ver — lo más eficientemente posible y con un mínimo costo o esfuerzo. Significa hacer módulos, aparatos locales que le faciliten al organismo interactuar con el mundo, lates como ojos que ven o un sistema vestibular que le preste al organismo el sentido del equilibrio, y significa también que, a lo largo del tiempo, la manufactura de tal aparato sea lo menos costosa posible.

Si unos ojos suficientemente grandes como para ver en la oscuridad impidieran la movilidad del animal, podría decirse que el cosco es demasiado alto para la naturaleza y al final no se ven ojos gigantescos por ahí. A pesar del saludable respeto que tengo hacia la evolución, he llegado a creer que ésta puede explicarse básicamente como un producto de la Ley Universal de la Pereza. Esta ley ordena la comodidad y la utilidad: la vía de la menor resistencia. La luz es gratis (me refiero a la luz del sol). No nos cuesta nada. ¿Y qué sucede? La naturaleza aprovecha que la energía luminosa es gratis y fácil de absorber. Además, soporta plantas que producen su propio alimento y activa parches en la piel que se convierten en ojos capaces de generar imágenes del mundo externo. Todo esto resulta de haber tomado la vía de la menor resistencia. Tomar lo útil, descartar lo inútil y, sobre todo, evitar riesgos.

Ahora bien, esto en realidad lleva a un planteamiento más profundo. Tenemos ojos que evolucionaron para generar imágenes del mundo externo mediante las propiedades de rebote de los fotones. Pero, ¿qué es una imagen? Una imagen es una simplificación de U realidad. El cerebro constantemente simplifica la realidad, más aún, simplifica el mundo externo pero en forma muy útil. Una imagen es una representación simplificada del mundo externo escrita en forma extraña. Cualquier transducción sensorial es una representación simplificada de un universal emanado del mundo externo. El cerebro es muy kantiano en cuanto a la esencia de sus operaciones. Representa aspectos del mundo externo, aspecto fraccionados, mediante una geometría útil, una geometría con significado interno que no tiene nada que ver con la "geometría" del mundo externo del cual emanó. Ésta es la capacidad transformacional vector/vector del

cerebro, que es independiente de los sistemas de coordenadas utilizados para tal transformación.

Los colores, por ejemplo, son simplemente una forma particular de transducir la energía de cierta frecuencia. Una serpiente ve el rango infrarrojo, que en realidad es calor. Es muy claro que las imágenes en nuestra cabeza son tan sólo una representación del mundo.

Los ojos tienen neuronas que internalizan geometrías de luz que rebota, y el cerebro es un conjunto de sistemas de coordenadas que miden o reconocen geometrías abstractas inexistentes en el exterior. El olor del bosque es una abstracción interna que no existe como geometría externa.

Aquí tenemos otro punto por considerar: el lenguaje es un ojo, pero un ojo abstracto, una abstracción interna.

Así como el parche de piel fotosensible se convirtió en un ojo, el lenguaje, tal como lo conocemos, siguió una trayectoria similar. Ambos son aparatos especializados para internalizar geométricamente propiedades externas fraccionadas. Tenemos, pues, las siguientes secuencias: parche/arruga/concavidad /cámara oscura / ojo con lentes y/o espejos; la generación de protorredes llega a un sistema funcionalmente maduro, análogo al protolenguaje y al desarrollo del lenguaje (¡tal vez todavía no sea sino un protolenguaje!).

Afirmo que soy un sistema cerrado pero no un solipsisto. No puedo serlo, porque soy el producto de la evolución que internalizó las propiedades del mundo externo.

Imagen tomográfica tridimensional que representa un estímulo auditivo (corriente a 63 ms), Cortesía de NYU Medical Center/Visualization Data Explore.

6

EL MITO DEL "YO”

La conciencia y la naturaleza de la subjetividad

Habiendo mencionado brevemente las reglas de la fisiología celular mediante las cuales la naturaleza interiorizó los componentes fraccionados del mundo externo (capítulos 1 a 3), abordemos el problema de la síntesis: ¿cómo se unen estos diversos componentes en una estructura simple, global e interna que represente la realidad externa? Dado que las neuronas de varias "personalidades" son por definición relativamente especializadas, ninguna actividad particular de una sola célula (capítulo 4), puede representar más que un pequeñísimo fragmento de tal realidad. En el capítulo 5 vimos que los fotorreceptores se especializan en capturar fotones y transducir esta energía electromagnética en actividad eléctrica. También en la piel tenemos los llamados mecanorreceptores, células especializadas para transducir la energía mecánica en patrones de actividad neuronal (figura 6.1). Así, usted está sintiendo este libro en sus manos en parte por el arreglo de los diversos mecanorreceptores, que lo informan acerca de los cambios y diferencias de

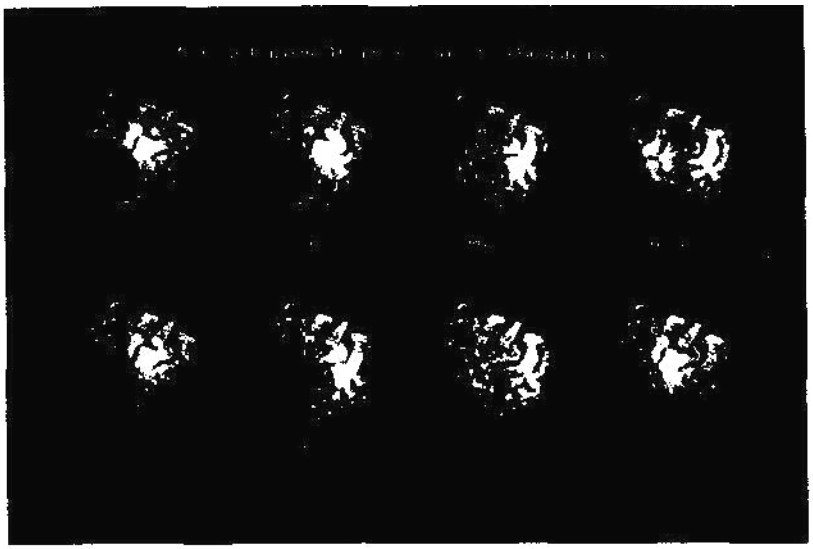


Figura 6.1

Registros magnetoencefalográficos (MEG) realizados con múltiples bobinas de superficie, que muestran que la activación de regiones sensoriales y motoras de la corteza cerebral durante movimientos voluntarios de la mano tiene propiedades oscilatorias con especificidad temporo-espacial. En la cuarta imagen de la fila superior se observa la activación de las áreas corticales sensoriales (a la derecha) y motoras (a la izquierda). Los registros de MEG se superpusieron con las imágenes de RM (resonancia magnética) de la corteza del sujeto. En las áreas punteadas. la activación as máximo, y alrededor de ellas la actividad es menor. (LADO. Ribary y LLINAS datos inéditos.)

presión en la piel. Los receptores de las articulaciones y los sensores musculares conocidos como "husos musculares" trabajan en paralelo (al mismo tiempo) con los receptores de presión y confieren el sentido de la posición de las manos en el espacio. En resumen, no es necesario que el lector vea el libro en sus manos para saber que lo está sujetando.

Prosigamos nuestro intento por comprender la subjetividad, que es el problema central del presente capítulo. Una cosa es que el sistema nervioso esté en capacidad de ejecutar un determinado proceso (el conjunto apropiado de pasos para producir la digestión, por ejemplo) y otra muy distinta, que usted sepa algo. El problema de la subjetividad es un tema candente en los campos de la filosofía y las ciencias cognoscitivas. Pero, ¿es necesaria la subjetividad? ¿Por qué

no es suficiente ver y reaccionar como lo haría un robot? ¿Qué ventajas le ofrece al organismo experimentar sensaciones, en lugar de responder a ellas automáticamente? Es importante considerar si los animales podrían no tener subjetividad y, sin embargo, reaccionar como si la tuvieran. Algunos estudiosos señalan que el hecho de no poder determinar directamente si los animales tienen sentimientos subjetivos (cualias) implica que no los tienen. Sin embargo, algunos de nosotros razonamos que quienes niegan la subjetividad en los animales son quienes tienen que demostrarlo. Por mi parte, sospecho que aun en los niveles más primitivos de la evolución, la subjetividad es la esencia constitutiva del sistema nervioso. Como corolario obvio de tal Sospecha, pienso que la conciencia, como sustrato de la subjetividad, no existe fuera del ámbito de la función del sistema nervioso o de su equivalente no biológico, si es que tal cosa existe.

Sabemos que tos "animales" unicelulares son capaces cíe irritarse y de responder a estímulos externos con conducías organizadas dirigidas hacia una mera. Es difícil hacer caso omiso de que tal propiedad es probablemente el antepasado de la irritabilidad y motricidad de las células sensoriales y musculares, respectivamente. Lo anterior nos deja con la incómoda impresión de que la irritabilidad y la subjetividad (en un sentido muy primitivo) son propiedades pertenecientes a una sola célula. En tal caso, esta subjetividad primitiva sería la base de la conciencia y de la subjetividad, mostrada por el sistema nervioso como organización celular a medida que se van creando los conjuntos que conocemos como circuitos neuronales. Nótese, sin embargo, que tal forma primitiva de subjetividad y el concepto de "célula de abuela", el cual se discutirá en detalle más adelante en este capitulo (y en el capítulo 10), son dos cosas muy diferentes.

En el presente capítulo intentare ampliar la posición básica de este libro, a saber, que el problema de la cognición es ante todo un problema empírico y, por lo tanto, no es un problema filosófico, cosa ya discutida por algunos de los más distinguidos biólogos del siglo pasado (Crack, 1994; Crick y Koch, 1990; Changeux, 1996; Changeux y Deheane, 2000; Edelman, 1992, 1993; Mountcastle, 1998).

Ya se mencionó que para interiorizar universales él cerebro debe poder implementar sistemas de coordenadas con las cuales se mida, el mundo que nos rodea (capítulo 3). Si le seguimos los pasos al flujo de actividad cerebral (desde los receptores sensoriales periféricos o hacia los órganos efectores —glándulas y músculos—), veremos que las transformaciones geométricas, mediante las cuales el marco de referencia sensorial se pone en comunicación con el motor, se hacen cada vez mas abstractas. No es sorprendente, pues, que términos tales como "niveles superiores de cómputo" se usen frecuentemente en neurociencia para referirse a ámbitos funcionales con muchos pasos. Sin embargo, cuando una neurona genera un potencial de acción, cabe preguntarse si en tal actividad hay algo que sea realmente de cómputo. Se trata de un problema bien importante, porque tas suposiciones con base en tal lenguaje pueden no ser aplicables al cerebro y tal uso puede estimular planteamientos erróneos.

Representación sensorial

Nuestras investigaciones en neurociencia han tenido como objetivo fundamental transformar el conocimiento de las propiedades de las diferentes partes del sistema nervioso en una teoría concerniente a la función global del cerebro. Por ejemplo, el estudio de los sistemas sensoriales busca descubrir la relación entre la función •de las células sensoriales con propiedades receptivas generales (los fororreceptores) y la función de células con propiedades más especificas. Se supone que el procedimiento general consiste en delegar el análisis de los detalles sensoriales a componentes cada vez mas especializados y, por lo tanto, mas eficientes. Pero, ¿cómo puede ser algo más eficiente, sí cada vez se aleja más del nivel de la observación directa que ofrecen los sentidos y se acerca más a los abstractos y recónditos repliegues de la función cerebral? Resulta que la función cerebral es la que elabora la realidad, cosa nada fácil de hacer. Algunas enfermedades neurológicas revelan que la capacidad de reconocer y de responder

a la realidad puede alterarse de innumerables maneras, y estos trastornos nos permiten descubrir el sorprendente cooperativismo de la función cerebral. Para este efecto, todas las partes son importantes, aun las que en un momento dado se hallan en silencio. Al igual que en la música, también en la función cerebral el silencio es tan importante como el sonido.

Aunque esta línea de pensamiento sea la parte central de nuestro intento de encender la función cerebral, también puede llevar a nociones erróneas. Como ejemplo, ello ha dado lugar a la creencia de que son apropiados términos tales como "células de cara" o "células de abuela", cuyo patrón de disparo le indicaría al individuo reconocer o recordar a su abuela (ver por ejemplo, Gross y Sergent, 1992; Rolls, 1992). El problema fundamental de este modo de pensar es fácil de explicar. Sí la operación de cada neurona representa sólo el conocimiento de un componente muy específico de la realidad (reconocer a la abuela), entonces, ¿a quién se transmitiría esta información en el resto de! cerebro para hacer entender a. otras neuronas, que no lo saben, ya que sólo una es la que reconoce a la abuela? ¿Qué déficits cognoscitivos se observarían al lesionar tales células? ¿Podría esfumarse la abuela de nuestro mundo cognoscitivo con la muerte de esas células? Es instructivo considerar aquí el número realmente galáctico de posibilidades de representación que el cerebro puede hacer. Ese número excede al número de neuronas disponibles en el cerebro (Tononi et al., 1992), lo cual constituye un, fuerce argumento fisiológico en contra de las anteriores ideas.

Sin embargo, no es difícil entender cómo se llegó a estos puntos de vista.

Por los anos 50 del siglo pasado, Wilder Penfield y Herbert Jasper hicieron aportes fundamentales sobre la organización funcional del cerebro. Posteriormente sus hallazgos se generalizaron (indebidamente), trascendiendo el límite bien definido de las investigaciones originales.

En sus estudios iniciales sobre epilepsia intratable, Penfield y Rasmussen (1950) extirparon quirúrgicamente el foco de origen de la actividad eléctrica anormal. Durante estas intervenciones quirúrgicas, en las que el paciente se encuentra despierto y bajo anestesia local, el cirujano estimula eléctricamente diversas áreas de la corteza cerebral (procedimiento completamente indoloro). En ciertas regiones corticales, la estimulación eléctrica provoca contracciones musculares en las diferentes partes del cuerpo (pies, manos, etc.). Igualmente, cuando se estimulan regiones corticales cercanas a las anteriores, los pacientes reportan sensaciones en sitios específicos del cuerpo. Tras un minucioso trabajo, se levantó el mapa de lo que hoy llamamos cortezas motora y somatosensorial. Muchas de estas áreas corticales se organizan somatotópicamente, en el sentido de que la actividad de sus respectivas células tiene una correspondencia punto a punto con diferentes áreas del cuerpo. Por ejemplo, los dedos de la mano izquierda se representan como un mapa neuronal de la mano (con los dedos en el sitio y orden correeros), que se ubica en la corteza motora en lo referente a la generación del movimiento y en la corteza somatosensorial en lo referente a la información táctil que llega de la periferia. Aunque hay una relación punto a punto entre estas arcas y el cuerpo, tales mapas están profundamente distorsionados respecto a la extensión del área que representan y por una buena razón: por ejemplo existe muchísima más área de la corteza dedicada a la lengua, que la dedicada al talón. Las funciones táctiles y motoras de la lengua son, desde luego, considerablemente más elaboradas que las del talón. Asimismo, la piel del dedo índice tiene mucha mayor "propiedad raíz" en la corteza que la que tienen áreas proporcionales de la espalda. La sensibilidad táctil es muchísimo mayor en el índice que en la espalda. Esta diferencia de resolución corresponde a la importancia del órgano para el individuo: tener el índice completamente dormido e inútil interferirá más con el entorno que tener dormida un área de la espalda.

Si se dibuja la representación somatotópica del cuerpo, de manera que se conserven las proporciones del número de superficies corticales adscritas a sus diferentes partes, resulta una distorsión humanoide de proporciones casi "extraterrestres". En neurociencia, este mapa en el humano se denomina el "homúnculo cortical".

Todos los animales con un sistema nervioso tienen "animalúnculos" específicos, aunque por razones obvias el nuestro se halla "fortificado" neurológicamente, más en algunas áreas y

menos en otras. En breve volveré al problema de los mapas espaciales punto a punto.

Cuando Penfield estimuló eléctricamente la corteza del lóbulo temporal (compleja estructura que sirve de base a numerosas funciones, que incluyen el procesamiento auditivo, el lenguaje y el reconocimiento facial), los pacientes informaban sentir eventos visuales o auditivos tales como "oír una sinfonía" o "ver a mi hermano" y cosas por el estilo. Lo anterior llevó a algunos neurocientíficos a sugerir que ciertas neuronas de la corteza temporal almacenan determinada memoria, como si el cerebro pudiera crear una videocinta de un fragmento de la vida del individuo. Dada la representación relativamente precisa, punto a punto, del cuerpo en la corteza motora y somatosensorial, no es difícil comprender que la teoría de tal "célula de memoria" emergió como paso lógico.

Según estudios más recientes, las células de ciertas áreas del lóbulo temporal inferior del chimpancé realmente demuestran una sorprendente selectividad de respuesta neuronal a la presentación visual de una cara (ver Perrett e al., 1996). Sin embargo, se encontró que estas células "de cara" respondían también a diferentes estímulos visuales, aunque con menos intensidad (Gross y Sergent, 1992).

Otras investigaciones sobre el control neural de las vocalizaciones en primates muestran que en el mono las células de la sustancia gris periacueductal emiten respuestas eléctricas muy claras antes de la vocalización y alcanzan un máximo en el momento en que el mono emite la vocalización (Larson y Kistler, 1984, 1986;

Larson, 1985; Kirzinger y Jurgens, 1991, 1998; Zwirner y Jurgens, 1996). Además, este tipo de células sólo se activa antes de vocalizaciones de ciertas frecuencias específicas. La pregunta entonces es: ¿Hemos encontrado las células que codifican todos y cada uno de los tonos de las vocalizaciones? Si así fuera, tendríamos el mapa neuronal del repertorio de vocalizaciones del mono. ¿Pero es esto verdad? Tentador quizás, pero resulta que algunas de estas células vocalizadoras también responden a estímulos auditivos y otras se correlacionan con movimientos oculares en ciertas direcciones (Larson y Kistler, 1984). El problema de base aquí es que si al interpretar los datos se pasan por alto las respuestas secundarias de .estas células, se está representando intencional y erróneamente la complejidad del sistema, lo cual lleva a una falsa concepción de su verdadera función.

Volviendo a nuestra célula "de cara", o "de abuela", muchos .estudios sugieren que tal representación categórica se lograría gracias a la actividad de poblaciones celulares y no mediante la actividad eléctrica de una célula en particular. Es obvio que el concepto de "célula de abuela" implica que la diversa información sobre la abuela y los múltiples posibles estados de esa abuela en la vida real harían de tal célula un rompecabezas con una conectividad gigantesca. Y esto habría que hacerlo con cada una de las personas y cada uno de los objetos y todas las posibles relaciones entre ellos.

.Entonces, ¿cuál es el mecanismo que pudiera unificar la información de fuentes sensoriales dispersas, de modo que la representación interna sea única? Este mecanismo también debe relacionar las memorias y/o pensamientos relacionados con tal representación. Imaginemos que estamos leyendo este libro en voz alta, que lo sostenemos con una mano y que lo hacemos estando descalzos. En nuestro cerebro esto se unifica en un solo evento, de manera perfectamente continua en el tiempo y sin la menor dificultad, ya sea como una imagen mental o como un acto real. Muy diferente del caso anterior sería la situación en la que cada neurona individual representara un aspecto singular predeterminado y altamente específico de dicho evento. Nótese que al crear la experiencia, se están unificando elementos que son propios de la persona (la mano y los pies descalzos) con elementos verdaderamente ajenos (el contenido del libro).

Esto plantea el interrogante de si el cerebro maneja la representación corporal de la misma manera como maneja la representación de objetos y eventos que no son parte del sí mismo — aquéllos que pertenecen al mundo externo. ¿Existe una sola solución para el conjunto de preguntas aquí planteado? Veamos.

Unidad perceptual de la consciencia— Contenido y contexto

Volvamos a la pregunta que nos planteamos al comienzo del capítulo. Si las neuronas evolucionaron para efectuar diversas funciones especificas que representan únicamente fragmentos de la realidad, entonces ¿cómo se las arregla el cerebro para armar una estructura singular y útil a partir de estos pedazos? Integrar las diferentes informaciones sensoriales específicas en un "percepto" singular o, más aún, integrar los mecanismos neuronales subyacentes a esta hazaña resulta incluso tanto más sorprendente (y por ende, de más difícil estudio desde el punto de vista experimental) en cuanto que el cerebro lo hace de manera contextual. Ya lo mencionamos en el capítulo 1.

La integración de las señales sensoriales en una percepción depende de un contexto interno del cerebro, al que hemos dado en llamar atención (una intención funcional momentánea), que se identifica fácilmente si se comparan los estados de vigilia y de sueño. Si estando despierto alguien me susurra al oído que tengo una, abeja en el pelo, probablemente haré algo al respecto, pero si esto sucede mientras duermo, lo más probable es que no responda. Al someter esta situación a condiciones experimentales y monitorizar el flujo de información auditiva desde el oído hasta el cerebro, se vería que en ambas circunstancias (vigilia y sueño) la señal se codifica de la misma manera en el aparato sensorial periférico. ¿Por qué no se oye la información durante el sueño? Porque la señal no llega sino a cierto nivel de procesamiento, después del cual el cerebro la y lo hace, porque durante el sueño no incorpora la entrada sensorial en el contexto interno prevalente del momento. El contexto interno del cerebro que duerme no le presta importancia al significado de las palabras susurradas o a la mayor parte de la información sensitiva, a menos que sea lo suficientemente intensa como para despertarnos (Llinás y Pare, 1991). Pero en vigilia esas palabras captan la atención del momento, y posiblemente desencadenan una respuesta clara y explícita.

El problema de la atención

Consideremos el ejemplo de alguien que intenta ponerle atención a un conferenciante cuando la persona de atrás no se está quieta, caso en el cual la primera hará caso omiso del ruido de atrás para darle significado interno sólo a lo que desea escuchar. Propongo este ejemplo porque creo que pone de relieve los matices de los diversos contextos internos y los sutiles cambios que pueden sufrir y que de hecho sufren en muy cono tiempo. La hipótesis a exponer en el presente capítulo es proponer cómo las representaciones fragmentadas de las propiedades de estímulos individuales, observadas en las áreas sensoriales primarias del cerebro, se pueden amalgamar para formar un estado funcional único: la cognición. También es tarea de este capitulo sugerir cómo a estos patrones así reconstituidos se les dará significación internamente de acuerdo con el contexto prevalente en el momento. Más adelante trataré en mayor detalle del contenido y del contexto de tales representaciones pero, por ahora, abordaré la primera parte de la hipótesis. Estudiaremos de qué manera el cerebro asimila los fragmentos de la realidad referida sensorialmente, agrupándolos en el tiempo como una única estructura cognoscitiva.

Desde hace mucho tiempo es de dominio común en la investigación neurológica que en el ser humano los circuitos generales con los que nace, más que modificarse radicalmente durante la maduración normal, se especializan. Los circuiros neuronales necesarios para mover los dedos nos acompañan desde el nacimiento y por lo tanto no los tenemos que aprender. En cambio si se desea tocar un instrumento como el violín, particularmente con cierto valor estético, se requiere práctica. En esto consiste la exquisita especialización basada en la experiencia de las conexiones sinápticas, de las cuales hablé en el capítulo 3. Es evidente que la habilidad y especialmente la musicalidad con la cual se interpreta dependen y están limitadas por un conglomerado de capacidades que al nacer ya se hallan presentes, pero que con la práctica pueden desarrollarse o facilitarse en mayor o menor grado. Otro ejemplo es la capacidad lingüística, genéticamente determinada, cuyos circuitos neuronales nos acompañan desde el nacimiento; el aspecto "am-

biental" de esta ecuación se refiere al idioma particular que será nuestra lengua materna. El abordaje y comprensión de estos a priori estructurales comenzó con la identificación del área cortical del lenguaje (Broca, 1861) y prosiguió con el trabajo anatómico de Ramón y Cajal. Con la "doctrina neuronal", Cajal demostró que las neuronas son las unidades básicas de la organización cerebral, y pasó a describir los diferentes circuitos neuronales presentes en todos los cerebros normales. Posteriormente, esta conectividad funcional se corroboró con los mapas somatotópicos punto a punto de Penfield Tales conexiones "punto a punto" varían ligeramente entre individuos, de modo semejante a las otras variabilidades anatómicas normales (estatura, distancia entre los ojos, etc.). Sin embargo, no cabe duda de que tener dos ojos, una nariz entre ellos y una boca abajo es una constante esperada en todos los humanos. Así pues el tálamo, la corteza y la conectividad específica entre ellos no es algo aprendido sino heredado.

Este a priori estructural de conectividad neuronal punto a punto, que recibe el nombre de "mapa espacial", se debe a los vínculos entre neuronas funcionalmente relacionadas. Es claro que el número de neuronas funcionalmente relacionadas en un grupo es finito y, por ende, el número de posibles conexiones entre ellas también lo es. De aquí se deduce que existe un universo finito de posibles representaciones creadas por estas neuronas, por sus interconexiones y por sus actividades individuales. Sin embargo, para efectos prácticos, y especialmente dado el lapso de la vida humana, las variaciones y permutaciones de la actividad neuronal de un cerebro con 10 billones de células son ilimitadas.

Surge, pues, una importante pregunta: ¿Podría la organización jerárquica emanada de la comunicación entre neuronas unificar los diferentes retazos de realidad que llegan por los sentidos y Conformar un único conjunto perceptual interno, generando células omnisapientes? El lector sospechará que probablemente ello no es posible. Una conectividad que se basara tan sólo en las leyes de la jerarquía sería demasiado lenta y tortuosa para mantener el ritmo de los continuos cambios del mundo externo. Debemos buscar otro mecanismo.

Cotemporalidad es conciencia

Probablemente lo que buscamos es la coherencia temporal. Se dice que durante el desarrollo cerebral, "las neuronas que disparan juntas se conectan juntas" o, dicho de otro modo, "las neuronas que disparan juntas conspiran juntas" o "la cotemporalidad es la conciencia". Si se superponen los mapas de conectividades temporales con los mapas espádales, que de por sí son limitados, se genera un conjunto mucho mayor de posibles representaciones, en virtud de que tas posibilidades de combinación se vuelven entonces prácticamente infinitas. En esto radica el concepto de unidad perceptual, que es en suma la conjunción espacial y temporal. La conectividad física permitió a las células nerviosas del cerebro una solución de "interrelación": la unificación sincrónica de sus respectivas actividades individuales. Puesto que pueden conformar diversos patrones interrelacionados temporalmente, las neuronas también pueden unificar la realidad combinando los aspectos individuales y fraccionados que cada neurona posee. Este fenómeno de interrelación temporal se denomina coherencia temporal. En el capítulo 2 se vio que la oscilación eléctrica en fase, o resonancia, efectuada por módulos enteros de neuronas (cuyas actividades representan aspectos fragmentados del mundo externo) conforma patrones globales de actividad. Este patrón de actividad tendrá entonces todos los componentes necesarios para desarrollar una estructura funcional interna, transitoria, que representa el momento actual de la realidad del mundo externo.

Es decir, que tal coherencia temporal es el mecanismo neurológico básico de la unidad perceptual, al poner junios los componentes sensoriales independientes, la llamada "unión cognoscitiva". La "unificación motora", que es más sencilla de comprender, se produce de manera análoga a la anterior, pues como vimos en el caso de la oliva inferior, para efectuar adecuadamente el más simple de los movimientos la motricidad requiere que la activación temporal de los músculos sea altamente precisa.

Hasta épocas recientes, el mapeo temporal del cerebro resultó más difícil de estudiar y de

comprender que el mapeo espacial, porque el primero implica comprender la dinámica de la función cerebral. Básicamente, la filosofía prevalente en nuestros estudios se ha basado en la electroanatomía (cuál neurona inhibe, o cuál excita, y a quién), pero esto no basta. Pese a que, en general, hoy en _día cada vez se acepta más el concepto de mapeo temporal, éste ha sido un parámetro descuidado en la neurociencia, por razones principalmente técnicas pues, para ser estadísticamente significativo, requiere registros eléctricos simultáneos en un elevado número de neuronas. Así, es necesario demostrar, con la utilización de análisis de series temporales, que los disparos son simultáneos y que las correlaciones obtenidas se relacionan causalmente con el evento sensorial o motor que supuestamente generó tal actividad.

La activación sincrónica de neuronas espacialmente dispersas es un mecanismo que probablemente aumenta la eficiencia del cerebro. Desde hace cierto tiempo se conoce tal simultaneidad de la motricidad o de la actividad cerebral derivada de la motricidad. Un buen ejemplo de ello es el choque eléctrico producido por peces como la anguila eléctrica o el elasmobranquio Torpedo marmorata (Bennett, 1971). Los "órganos eléctricos" del pez, las electroplacas (los componentes paralizadores del sistema eléctrico), deben operar sincrónicamente. Si se liberan todas al unísono, las pequeñas corrientes producidas en cada diminuta electroplaca se suman y configuran el golpe eléctrico paralizante. ¿Como se logra tal sincronía si las electroplacas se localizan a diversas distancias del núcleo de comando central? Bien, las neuronas del núcleo de comando disparan sincrónicamente y el tiempo de conducción a las electroplacas es uniforme, ya que las velocidades de conducción de las diferentes neuronas motoras varían directamente con la distancia a la cual se encuentra la electroplaca que debe ser activada. Es decir, como las longitudes de los axones de las neuronas motoras son diferentes, los más largos conducen su señal más rápido y los más cortos más lentamente, de modo que las señales llegan al mismo tiempo, independientemente de la distancia a la cual se hallen de sus blancos. Vemos, pues, que la naturaleza aborda el problema de la simultaneidad con gran precisión, ajustando las velocidades de conducción para garantizar que su efecto sea sincrónico, sin lo cual, en lugar de producir "parálisis", el pez produciría "cosquillas". Igual activación isocrónica se observa ante grandes disparidades espaciales, como se vio en el sistema olivo-cerebelar de los mamíferos descrito en el capítulo 2. Numerosas células de Purkinje de la corteza cerebelar, muy distantes unas de otras, se activan sincrónicamente por influencia directa de la oliva inferior (Sugihara et al, 1993; De Zeeuw et al, 1996), y esto se logra nuevamente debido a que las velocidades de conducción varían según la longitud de los axones que llevan la señal.

¿Se tiene alguna evidencia de que durante la entrada sensorial la activación neuronal sea sincrónica? Se trata de una importante pregunta, pues se esperaría que si la unidad perceptual de los objetos y eventos del entorno ocurre por la conjunción del mapeo cerebral espacial y temporal, entonces las neuronas relacionadas con la. entrada y el procesamiento sensorial deberían activarse sincrónicamente — que es precisamente lo que se observa. Es lo que se encuentra en la vía visual cuando se activa la totalidad de las células ganglionares de la retina: la salva de actividad neural que liega por e) nervio óptico es sincrónica al llegar al tálamo (Stanford, 1987).

Los estímulos luminosos, tanto estacionarios como de movimiento, también evocan respuestas oscilatorias en las células ganglionares de la retina, cuyas mitades nasal y temporal están sincronizadas y evocan respuestas sincrónicas al nivel del tálamo (Neuenschwander y Singer, 1996). Por ende, las actividades de las porciones central y periférica de la retina tienen tiempos de conducción semejantes, a pesar de que los axones sensoriales entre las células de ganglios periféricos y el tálamo pueden ser el doble de largos que los de las células de ganglios próximos al nervio óptico. Se trata de un caso más de modificación de la velocidad de conducción para lograr la sincronía.

En el ámbito del sistema nervioso central, en la corteza cerebral de los mamíferos, Wolf y Singer y su colega Charlie Gray observaron que, ante barras luminosas de dimensiones, orientaciones y velocidades óptimas, ciertas columnas de células de la corteza visual producen una actividad sincrónica generalizada. (Eckhorn et al., 1988; Gray y Singer, 1989; Gray et al.,

1989). Además, los componentes visuales generados por un objeto cognoscitivo singular (tales como una raya en el campo visual) producen "oscilaciones gamma" temporalmente coherentes (próximas a los 40 Hz) (Gray y Singer, 1989; Gray et al., 1989). Fastas oscilaciones se evo-/^ can en la corteza a distancias de unos 7 mm (lo que, para efectos de “propiedad raíz neural", es básicamente como si estuvieran en un país diferente). Así mismo, se observa una gran correlación con la actividad oscilatoria a 40 Hz, entre columnas corticales relaciona" das (al mismo tiempo y en la misma dirección), lo cual el cerebro interpreta como el movimiento de un objeto. Tales mecanismos oscilatorios de resonancia ya se mencionaron en el capítulo 2 al examinar la señal de control motor generada por el núcleo de la oliva inferior. Respecto a, la corteza visual, en ella se observan conjuntos dispersos de neuronas cuyas actividades se unifican temporalmente, con un claro ritmo que oscila a 40 Hz (Llinás et al., 1991: Núñez et el., 1992; Lutzenberger et al, 1995; Sokolov et al., 1999).

Los mecanismos fisiológicos mediante los cuales el cerebro permite que la organización (neural) de la percepción sea simultánea son tan fascinantes como complejos. Antes de abordar los aspectos básicos neuronales de tal organización, introduciré al lector al proceso explícito y global que considero como el candidato ideal para implementar esta unificación cognoscitiva tan esencial. Se traca de un mecanismo que es producto canto de la interiorización evolutiva de la motricidad como de la combinación de las propiedades eléctricas intrínsecas de oscilación de las neuronas.

40 Hz globales: la señal que unifica

Los estudios indican que durante tareas cognoscitivas se genera una actividad neuronal coherente de 40 Hz, suficientemente intensa como para detectarse en la superficie dérmica del cráneo. Además, hay quienes proponen que esta actividad de 40 Hz refleja las propiedades resonantes del sistema tálamo-cortical, dotado a su vez de un ritmo de 40 Hz (Llinás, 1990; Llinás et al., ,1991; Pedroarenas y Llinás, 1998; Steriade et al, 1991) Whittington et al., 1995; Steriade y Amzica, 1996; Steriade et al., 1996;

Molotchnikoff y Shumikhina, 1996) (figura 6.2). Mas aún, se ha candidatizado a la actividad coherente a 40 Hz como la responsable de que los componentes

DISPAROS COINCIDENTES

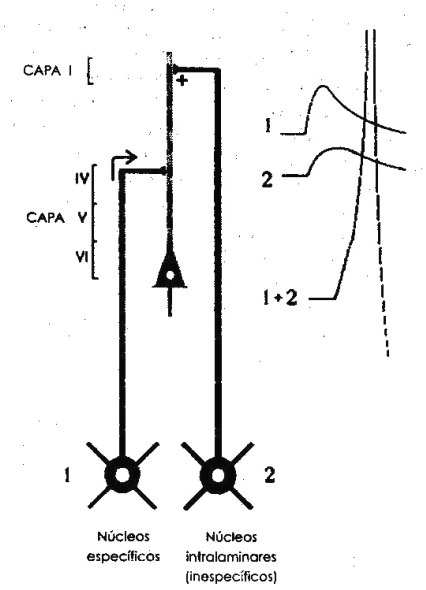


Figura 6.2

Diagrama simplificado que ilustra cómo se genera lo unificación temporal mediante la conjunción de vías tálamo-corticales que utilizan la actividad coincidente de 40 Hz y que. aunque espacialmente separados, convergen sobre el tálamo. Lo célula de la izquierda represento núcleos específicos sensoriales o motores que proyectan a la corteza cerebral (capa IV) mientras que la célula de la derecha representa núcleos in trola minares inespecíficos que proyectan a la capo más superficial de la corteza (capa 1). Ver texto para detalles. (Adaptado de Llinás et al., 1998, figura 6. p.1847.

vectoriales sensoriales y motores, que representan los detalles del mundo percibido, generen una unidad perceptual. ¿Qué significa lo anterior? Estamos ante un sistema que enfrenta al mundo externo, no como una maquina adormilada que se despierta sólo mediante estímulos sensoriales, sino, por el contrario, como un cerebro en continua actividad, dispuesto a interiorizar y a incorporara en su más profunda actividad imágenes del mundo externo, aunque siempre en el contexto de su propia existencia y de su propia actividad eléctrica intrínseca.

Si consideramos que las ondas coherentes a 40 Hz se relacionan con la ciencia, podemos concluir que está en un evento discontinuo, determinado por la simultaneidad de la actividad en el sistema tálamo – cortical (Llinás y Pare, 1991). La oscilación a 40 Hz genera un alto grado de organización espacial, por lo tanto, puede ser el mecanismo de producción de la unión temporal, de actividad rítmica sobre un gran conjunto de neuronas. El mapeo temporal global engendra la cognición. La unión de la información sensorial en un único estado cognoscitivo es implementado a través de la coherencia temporal de los impulsos de entrada, desde los núcleos talàmicos –específicos e inespecíficos- hasta la corteza. Esta detección de coincidencias conforma la base de la unificación temporal.

El sistema tálamo cortical y la generación del "yo"

Ya mencione la propuesta del que el cerebro pera como un sistema cerrado: no es sorprendente, pues, que la entrada el tálamo desde la corteza sea mucho mayor que la entrada de los sistemas sensoriales periféricos, lo cual sugiere que la actividad iterativa tálamo cortical sea un mecanismo primordial de la función cerebral.

Además, las capacidades intrínsecas oscilatorias de las neuronas de esta compleja red

sináptica (tálamo cortical) permiten que el cerebro autogenere estados dinámicos oscilatorios. Estos darán la forma interna a los eventos funcionales provocados por los estímulos sensoriales. El cambio de modalidades de disparo de las neuronas talámicas puede producir cambios macroscópicos (globales) en los .estados funcionales, tan dramáticos como el sueño y la vigilia. A mi modo de ver, el sistema tálamo-cortical evolucionó como la solución más enciente para la implementación de la coherencia temporal entre las diversas áreas cerebrales, las cuales no sólo difieren en sus papeles de emulación de la realidad, sino que se encuentran físicamente muy distantes entre sí. ¿Cómo? La organización "arquitectónica" del sistema tálamo-cortical permite comunicación radial de los núcleos con iodos los sectores de la corteza, entre los cuales se incluyen las áreas sensoriales, motoras y de asociación, siendo ésta ultima la que abarca la mayor parte de la corteza cerebral del Homo Sapiens, la cual recibe su entrada de los núcleos del tálamo, así como también de la corteza sensorial. Estas áreas están afectadas por un constante flujo de información reverberante, tanto de prealimentación como de retroalimentación.

El sistema tálamo-cortical es casi una esfera isocrónica cerrada que relaciona sincrónicamente las propiedades del mundo externo referidas por los sentidos con las motivaciones y memorias generadas internamente. *Este evento, coherente en el tiempo, que unifica los componentes fraccionados tanto de la realidad externa como de la interna en una estructura única, es lo que llamamos el "sí mismo". Se trata de un mecanismo extremadamente sencillo y útil por parte del cerebro. ¡Unifica, luego existo! La coherencia temporal no sólo engendra el "sí mismo",* como una estructura funcional, sino que crea un espacio a la centralización, en el cual las funciones predictivas del cerebro, tan criticas para la supervivencia, pueden operar de manera coordinada. Así pues, la subjetividad o el "sí mismo" se genera mediante el diálogo entre el tálamo y la corteza o, en otras palabras, *los eventos unificadores recurrentes constituyen el sustrato del "sí mismo".*

¿Es el evento unificador, en realidad, el sustrato o e! andamiaje del "sí mismo"? Los pacientes con lesiones en los núcleos talámicos intralaminares o inespecíficos (grupos celulares que reciben entradas ascendentes de la región del tallo cerebral llamada la formación reticular) no reconocen los impulsos provenientes del tálamo hacia la corteza a través de los circuitos tálamo-corticales intactos (ver Llinás y Pare, 1991).

Sin embargo, aunque estos impulsos son recibidos, el individuo afectado no los percibe ni reacciona ante ellos. En esencia, el individuo no existe desde el punto de vista cognoscitivo y, aunque los impulsos sensoriales intactos alcanzan la corteza, son completamente pasados por alto. Esto ocurre porque el "sistema no-específico" se requiere para lograr la unión; es decir, para colocar la representación de imágenes sensoriales específicas en el contexto de las actividades que se están desarrollando en el cerebro.

La predicción debe centralizarse porque conduce al "sí mismo"

Siendo la predicción la función cerebral más importante y generalizada, cabe preguntarse cómo se fundamenta físicamente el hecho de haber evolucionado en un único órgano predictivo. Imaginemos las importantes disparidades temporales que ocurrirían si, para emitir Juicios sobre la interacción entre los organismos y su mundo, hubiera más de un lugar de predicción. ¡No sería viable que la cabeza predijera una cosa y la cola otra! Al parecer, para una óptima eficiencia, la predicción debe suministrar una ubicación y una conectividad funcionales sólidas: de cierta manera, debe ocupar un lugar central dentro de la miríada de estrategias que el cerebro ejecuta para su interacción con el mundo externo. Esta centralización de la predicción es la abstracción que llamamos el "sí mismo.

El concepto de "yo"

El "yo" ha sido siempre la sublime incógnita; yo creo, yo digo, yo... lo que sea. Pero debe entenderse, obviamente, que el yo no es algo tangible. Es tan sólo un estado mental particular,

una entidad abstracta generada, a la cual llamamos el "yo" o el "sí mismo". Consideremos por un momento el resultado de una lesión en el piejo braquial (la red nerviosa encargada de la inervación sensorial y motora del brazo). En este caso, miraré mi brazo (nacido e insensible) y diré "esto no soy yo" — porque no lo puedo sentir. Resulta que "soy yo, o es parte de mí" depende de si lo sentimos como tal. Por alguna razón hemos desarrollado una extraña cosmología fisiológica, casi solipsista: "Sólo poseo lo que inervo" o "Sólo soy aquello que inervo". Parece extraño, pero así son las reglas del sistema que nos genera. Así, hemos desarrollado esta simple regla, de suerte que se coloca todo en una sola entidad que llamamos "el si mismo", la que además tiene una estructura espacial:

parada en el núcleo vestibular y con su cabeza en el cerebro — \o cual le da el sentido de posición (arriba o abajo) y todos los componentes sensoriales que ya conocemos bien (lo visual, lo auditivo, etc.).

Entonces ¿qué es el "sí mismo"? Se trata de una estructura muy importante y útil, un complejo "vector eigen" (el valor de si mismo). Los siguientes dos ejemplos ilustran lo que quiero decir, El primero es el concepto del "Tío Sam". Al leer en el periódico "el Tío Sam bombardeó Belgrado", se comprende que las fuerzas armadas de los Estados Unidos se han desplegado contra dicha ciudad, aunque ninguna entidad corresponda al "Tío Sam". Es un símbolo y también un concepto útil que implica una existencia, pero es una categoría sin elementos. El "yo", aquello por lo que trabajamos y sufrimos, es tan sólo un término útil, referente a un evento tan abstracto como lo es el concepto del Tío Sam respecto de la realidad de algo tan complejo y heterogéneo como son los Estados Unidos. Dada la escasa popularidad del patriotismo o de la idea de "patria como sí mismo" de nuestros días, el segundo ejemplo referente a la afición deportiva resulta aun más interesante. Consideremos los disturbios europeos o suramericanos asociados con los partidos de fútbol. Es interesante que para los aficionados fanáticos su equipo representa una extensión de ellos mismos, a tal punto que lucharán y arriesgarán su integridad personal por defender "su equipo", como otros podrían hacerlo por defender su propia vida, la de sus seres queridos, o quizás, sus ideales o su fe.

Cualidades secundarias de tos sentidos como Invenciones/estructuras.

Debería ser obvio que las cualidades secundarias de los sentidos, tales como los colores, olores, sabores y sonidos son sólo invenciones/estructuras de la semántica intrínseca del SNC (sistema nervioso central) (ver Llinás, 1987). Mediante esta semántica, el cerebro contextualiza internamente la información sensorial para interactuar con el mundo externo de una manera predictiva. Ya se mencionó que la abstracción conocida como el "sí mismo" no se diferencia fundamentalmente de las cualidades secundarias de los sentidos; el 'sí mismo" es una invención de la semántica intrínseca del SNC. Existe dentro del sistema cerrado del SNC como un polo de atracción, un remolino cuya única existencia real es la que le imparte el ímpetu común de panes dispersas. Es un organizador de percepciones derivadas intrínseca y extrínsecamente: es también el telar en el que se teje la relación entre el organismo y la representación interna del mundo externo.

Pero, en realidad, estas discusiones filosóficas referentes al grado en el cual nuestra percepción de la realidad se superpone o encaja con la realidad "de verdad", tienen poca importancia práctica. Sólo es necesario que las propiedades predictivas de los estados funcionales del cerebro se traduzcan en una interacción eficiente con el mundo externo. La forma como el cerebro afronta lo anterior, dada la naturaleza fragmentada de las entradas sensoriales, es el punto medular del estudio neurocognoscitivo contemperaneo.

Sueños y vigilia

Was it a vision, or a waking dream?
Fled is that music: — do I wake or sleep?
—John Keats, Ode to a Nightingale

¿Fue una visión o un soñar despierto?
Huyó la música; ¿estoy despierto o sueño?
—John Keats, Oda a un ruiseñor*

*Traducción de Gabriel Albiac (www, cnice.mecd.es/temáticas/filosofía/03bibliografia/pasajes/ lamuerte/pmuerte3.html)

Si la cognición es un estado generado intrínsecamente, "¿cuál es la diferencia entre los sueños y la vigilia? Suponiendo que la cognición sea una función de la resonancia tálamo-cortical de 40 Hz ya discutida, ¿qué sucede con este ritmo durante el sueño y, en particular, durante el período onírico o sueño MOR (movimientos oculares rápidos)? En experimentos realizados por mi colega Urs Ribary y por mí estudiamos la resonancia de 40 Hz durante la vigilia y el sueño a través de magnetoencefalografía con un sensor de 37 canales, sobre el cuero cabelludo de 5 adultos normales. Durante los estados de vigilia y de movimientos oculares rápidos (.MOR), observamos una actividad magnética espontánea y coherente de 40 Hz, la cual se reducía notablemente durante el sueño delta (sueño profundo caracterizado por un electroencefalograma de ondas delta y por la falta de percepción) (Llinás y Ribary, 1993) (figura 6.3). Por otra parte, según estudios previos (Ribary et al., 1991; Galambos et al., 1981; Pantev et al., 1991} un estímulo auditivo produce una oscilación bien definida de 40 Hz en vigilia, pero no durante los sueños delta o MOR (figura 6.3). De los estudios anteriores se desprenden dos hallazgos importantes: primero, que en lo referente a las oscilaciones de 40 Hz, la vigilia y el sueño MOR son estados eléctricamente muy semejantes; segundo, que

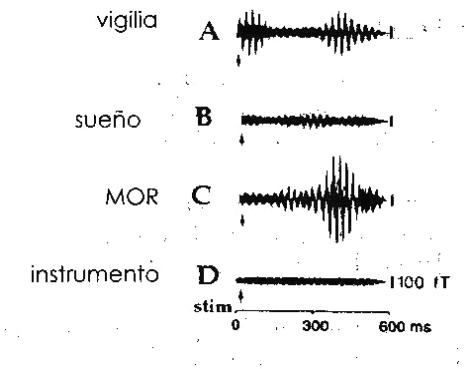


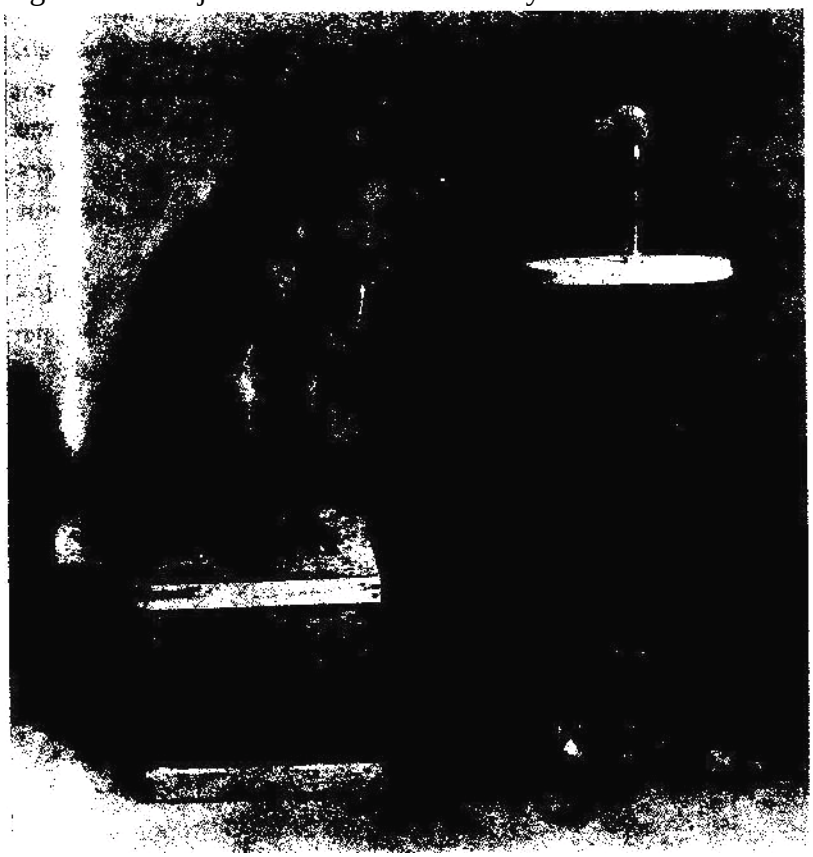
Figura 6.3
Oscilaciones de 40 Hz en la actividad cerebral registradas durante el sueño (ondas delio y sueño MOR) y lo vigilia, asociadas a estímulos externos (trazado inferior). Las oscilaciones ilustran la presencia de la activación cortical normalmente originado por un estímulo sensitivo y su ausencia en el MOR y durante el sueño tipo delta. Ver texto para detalles. (Adaptado de Llinás y Ribary. 1993, figura 1, p. 2079).

la entrada sensorial no modifica las oscilaciones de 40 Hz durante e) sueño (MOR), pese a que durante este estado la entrada sensorial tiene acceso al sistema tálamo-cortical (Llinás y Pare, 1991; Steriade, 1991). Esta es, a nuestro modo de ver, la diferencia fundamental entre el estado de ensueños y el de vigilia: durante el ensueño no percibimos el mundo externo, porque la actividad intrínseca del sistema nervioso no contextualiza la entrada sensorial, dado el estado funcional del cerebro en ese momento (Dinas y Pare, 1991).

Los resultados anteriores los hemos interpretado y sugerimos que la información sensorial durante el ensueño MOR es temporalmente independiente de la actividad tálamo-cortical del ensueño (es decir, no se correlaciona temporalmente con la "realidad tálamo-cortical" creada internamente durante el ensueño), por lo cual no existe como evento funcional significativo.

Aunque la vigilia y el sueño MOR generan experiencias cognoscitivas, los hallazgos anteriores corroboran, como lo es sabido bien por nosotros los humanos, que las imágenes características de los sueños prescinden casi por completo del entorno. En otras palabras, durante los sueños el cerebro se caracteriza por un incremento de la atención hacía su estado intrínseco, el cual, en general, no es afectado por los estímulos externos.

Por el contrario, si durante la vigilia las respuestas se incrementan en ausencia de información sensorial apropiada, se pueden engendrar estados en virtud de interacciones de actividad en la vía tálamo-cortical que emulan una realidad no existente, produciendo lo que llamamos "alucinaciones". Esta propuesta tiene algunas consecuencias. Si la conciencia es el producto de la actividad tálamo-cortical, como parece serlo, el diálogo entre el tálamo y la corteza genera la subjetividad en los humanos y en los vertebrados superiores.



William Wegman. Man Ray contemplando el busto de Man Ray. 1978, impresión en gelatina de plata. 36 x 28 centímetros.

7

PATRONES DE ACCIÓN FIJOS: MÓDULOS AUTOMÁTICOS CEREBRALES QUE GENERAN MOVIMIENTOS COMPLEJOS

Movimientos complejos

Nos encontramos, pues, ante una maravillosa "máquina" biológica, intrínsecamente capaz de generar patrones globales oscilatorio» que literalmente son nuestros pensamientos, percepciones, sueños, en fin, el "sí mismo". El siguiente nivel de organización funcional es, otra vez, uno que produce eficiencia. El "sí mismo", la centralización de la predicción (capítulos 2 y 6), no puede orquestar permanentemente todas tas hazañas realizadas por el cuerpo en un mundo en constante cambio. Los patrones de acción fijos (PAF) son conjuntos de activaciones motoras automáticas y bien definidas, algo así como "cintas magnéticas motoras", que cuando se activan producen movimientos bien delimitados y coordinados: la respuesta de escape, la marcha, la deglución, los aspectos prediseñados del trino de tos pájaros y otros semejantes.

De tales patrones motores se dice que son "fijos" porque son estereotipados y relativamente constantes, no sólo individualmente, sino para toda la especie. Esta invariabilidad puede verse tanto en los patrones motores muy sencillos como en los más complejos, Para efectuar reflejos espinales muy simples tío se requiere el cerebro. Si se irrita un área de piel en el dorso de una rana, se genera un reflejo de rascado. La pata trasera se moverá rápidamente hacia fuera y arriba de manera estereotipada, describiendo círculos para barrer el área afectada, cosa que se repite de manera idéntica en tedas las, ranas. Esta respuesta refleja se activa y se efectúa de igual manera en ausencia de cerebro y de tallo cerebral (descerebración), probando así que el sistema nervioso central superior no se necesita para la ejecución de simples reflejos motores rudimentarios. (Ostry et al, 1991; Schotland y Rymer, 1993). En el caso de la descerebración mencionada antes, si activado el reflejo se impide la trayectoria de la pata por medio de un obstáculo que le impida alcanzar su objetivo, la pata quedará detenida. No cambiará la dirección, ni el esfuerzo para sobrepasar el obstáculo, ni se saldrá de curso el movimiento estereotipado descrito. Este reflejo es "fijo" para lo que está hecho y lo que es. En este punto, para solucionar esta encrucijada motora se requerirá la ayuda del resto del cerebro.

Patrones de acción fijos y utilidad del comportamiento estereotipado

Los patrones de acción fijos (PAF) son reflejos algo más elaborados, que agrupan reflejos inferiores en sinergias (grupos de reflejos capaces de comportamientos dirigidos más complejos) (figura 7.1). Una vez que el sistema motor superior inicia la marcha, los circuitos espinales se encargan de regular el ritmo y de hacer pequeños ajustes ante las disparidades del terreno. Sin embargo, la medula espinal no basta para contextualizar la marcha (ver Bizzi et al, 1998).

Figura 7.1
Ejemplos de respuestas comunes de agresión en tres especies de vertebrados.

Las redes neuronales que especifican movimientos estereotipados, a menudo rítmicos y relativamente fijos al activarse se denominan generadores centrales de patrones (GCP) pues lo

que hacen es generar los patrones neuronales de actividad que impulsan PAF, tales como el de caminar (para una revisión, ver Cropper y Weiss, 1996; Arshavsky et al., 1997).

Se podría considerar que los PAF son módulos de actividad motora que liberan al "sí mismo" de gastar tiempo y atención innecesarios, en todos y cada uno de los aspectos del movimiento en curso. Es así como podremos haber caminado kilómetros enteros por las calles de la ciudad o por senderos boscosos, casi sin mirar, absortos en una interesante conversación con un amigo. En retrospectiva, lo que más se recuerda es el contenido de la conversación y nuestros sentimientos al respecto. La memoria visual almacenará sólo algunos detalles que llamaron la atención, como quizás el breve tropezón con una raíz o piedra, antes de recobrar el equilibrio y reanudar la marcha. Entonces, la conciencia de lo que pensamos y hablamos se dirige brevemente a la marcha. Es decir, por el tropiezo con la raíz, los sentidos hacen que el foco de la conciencia se oriente de dentro hacia fuera, de los pensamientos al cuerpo y al entorno en el cual nos movemos. Tras tropezar con la piedra o la raíz, la marcha retorna a su carácter de PAF y la conciencia vuelve a la conversación que nos interesaba previamente. El PAF de la marcha, como los otros PAF, liberan a' "mismo" del gasto de tiempo y tención, para dedicárselos a lo que realmente le interesa. En palabras más sencillas, si se hubiera de prestar atención a la mecánica de cada músculo y articulación en todas las fases del ciclo de la marcha, impulsándola conscientemente, ninguno de nosotros podría tener esas agradables conversaciones en el bosque en un día otoñal. Los PAF nos dan el tiempo para hacer otras cosas con nuestra mente.

El ejemplo anterior subraya otro importantísimo problema, que se relaciona con el efecto de las propiedades limitantes de los sentidos sobre el sistema tálamo-cortical, como ya lo mencionamos en el capítulo 6. En el caso anterior, el tropiezo con la raíz nos alejó momentáneamente de la conversación. Los sentidos nos recuerdan que hay un mundo fuera de nosotros que a veces olvidamos, ya que el mundo interno, generado por las propiedades intrínsecas del sistema tálamo-cortical, puede ser muy rico. Como seres humanos diferimos unos de otros en la manera como prestamos atención tanto al mundo externo como al interno. A lo largo del capítulo discutiremos en detalle este ejemplo, para destacar que las capacidades limitantes de los sentidos sobre el sistema tálamo-cortical también permiten que éste cambie o perfeccione los PAF e interactúe exitosamente con el mundo cambiante. Pero primero debemos ampliar nuestros conocimientos acerca de los PAF mismos y de las sorprendentes expresiones de su evolución a través de los milenios.

El sistema nervioso central es necesario para PAF más complejos que la locomoción, la cual puede desencadenarse únicamente con el tallo cerebral y la medula espinal (Jankowska y Edgley, 1993; Nichols, 1994; Whelan, 1996). Evolutivamente hablando, el lugar actual de residencia de los PAF es el cerebro (ver Arashavsky et al., 1997). Este proceso evolucionó según el mismo imperativo biológico que permitió la interiorización del movimiento como base de la mente; de hecho, es exactamente lo mismo. El reflejo de rascado, mecanismo puramente espinal (ver Deliagin et al., 1983; Stein, 1983, 1989; Mortin y Stein, 1989; Jankowska y Edgley, 1993) es un módulo funcional tan simple, que la selección natural no encontró necesario trasladarlo a regiones superiores del neuroeje o incorporarlo a capacidades más sofisticadas del sistema nervioso central. Tales capacidades se requieren para eventos (motores) más elaborados, como los complejos movimientos digitales perfectamente sincronizados que nos permiten disfrutar, por ejemplo, la belleza del Concierto para violín en La menor de Tchaikovsky interpretado por Jascha Heifetz. Viéndolo tocar este concierto de memoria, con los ojos cerrados, sonriendo como si estuviese absorto en otro mundo, nos preguntamos: ¿un PAF? ¿Puede la interpretación del concierto para violín ser un PAF? No completamente, pero sí en gran medida. De hecho, la ejecución única y fácilmente identificable que el maestro Heifetz le imprime al instrumento es un PAF enriquecido y modulado por las especificaciones del concierto y generadas en el sistema motor voluntario. Examinaremos este problema más adelante, cuando discutamos la relación entre los PAF y los orígenes de la creatividad humana.

Los ganglios basales como origen de los PAF

Se cree que los PAF más complejos se generan centralmente en los ganglios basales (Saine Cyr et al, 1995; Hikosaka, 1998), enorme conjunto de núcleos subcorticales íntimamente relacionados con los sistemas motores del cerebro (ver Savander et al., 1996). Debido a su "cableado" intrínseco, durante mucho tiempo la neurociencia sostuvo que los ganglios basales eran el almacén de los programas motores. Hoy en día, la arquitectura y la organización funcional de estos núcleos son una de las áreas menos conocidas del cerebro. Sabemos que los PAF se fundamentan en la interacción entre muy diversas partes del sistema nervioso y de los ganglios basales (Greybiel, 1995). Estos se localizan en el centro del cerebro, conectan sinápticamente con el tálamo y, a su vez, recíben información tanto de la corteza como del tálamo (para una revisión, ver Smith et al, 1998; Redgrave et al, 1999). De manera similar a lo que ocurre en el cerebelo, la mayoría de las conexiones internas de los ganglios basales son inhibitorias y tienen numerosos contactos recíprocos (ver Berardelli et al., 1998; Kropotov y Etlínger, 1999), lo cual implica que las neuronas terminan directamente una sobre la otra, de modo que la célula A proyecta hacia la célula B y ésta a su vez hacia la A, generando así patrones eléctricos inhibitorios muy complejos, que representan, en esencia, la negación de la actividad. Si realmente, cuando se activan, estos circuitos entre los ganglios basales representan las cintas motoras que implementan los PAF, se deduce que el estado de inactividad (en el cual no están momentáneamente conectados a las vías centrales o periféricas de las sinergias musculares que ejecutan y expresan plenamente este determinado PAF, es una condición de inhibición intrínseca mutua (figura 7.2). Recordemos el pasaje del Infierno de Dante, en el que se mantiene a las almas condenadas en calderas, pero sin que haya demonios que las vigilen para que no escapen de su tormento. La razón de que no haya vigilantes es que es la caldera de las envidiosas y, por lo tanto, si alguna trata de escapar, las tras la jalan hacia dentro. Tal caldera se cierra así sobre sí misma, al igual que los ganglios basales: la actividad inhibitoria intrínseca y recíproca impide que los PAF en potencia se manifiesten y, con ello, expresen sus supuestas funciones. Por esto, cuando un PAF se ejecuta, decimos que ha sido "liberado" a la acción. Los ganglios basales son compuertas que, de abrirse, liberan la ejecución de muy importantes funciones externas a ellos.

ASM

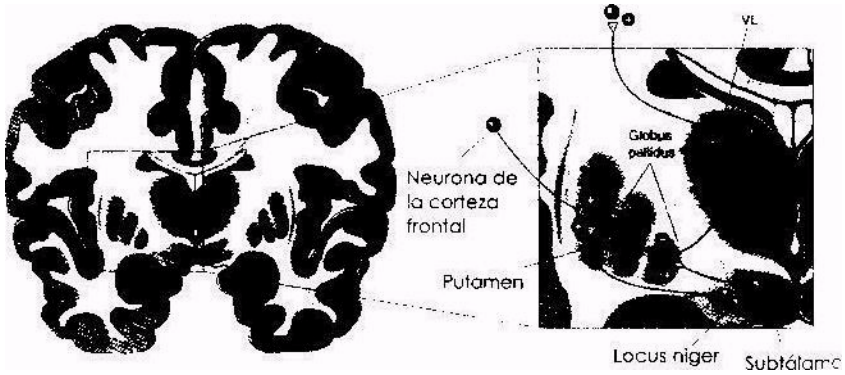


Figura 7.2

Diagrama de los ganglios basales y sus conexiones con la corteza frontal. El signo (+] índica sinopsis excilatorias y el menos (-) sinopsis inhibitorias. (Tomado de Bear et al., 1.996, figura 14.12, p. 390.)

Un gran cúmulo de evidencia neurológica/fisiológica sugiere que los ganglios basales representan o encarnan los circuitos neuronales de las secuencias motoras. Esto es evidente a la luz de las consecuencias que tienen las lesiones en los ganglios basales, o en partes del sistema nervioso relacionadas con ellos (Saint Cyret al, 1995; Wenk, 1997; Berardelli et al, 1998). La generación del trino en las aves es un ejemplo bien estudiado de PAF y es particularmente

pertinente en este caso, porque los pájaros cantan tanto según su genotipo como su fenotipo (Nottebohm, 1981a; Doupe y Konishi, 1991; Vicario, 1994; Whaling et al., 1997; MacDougal et al-, 1998). Es decir, desde el punto de vista del genotipo, un petirrojo podría tener un trino específico, característico de su familia. El macho canta, la hembra reconoce el trino y escoge al macho según la calidad del trino; pero ellas no cantan. El trino ancestral se expresa incluso en aves que han perdido la capacidad de oír, caso en el cual siguen cantando, aunque finalmente, sin la retroalimentación auditiva, el canto se distorsiona en patrones anormales (Nordeen y Nordeen, 1992; Heaton et al-, 1999).

Lo anterior sólo se refiere al trino de base de una especie dada, al cual los animales normales les añaden florituras o dialectos regionales. Cualquier ornitólogo bien entrenado puede reconocer en una gran ciudad el origen de cierto pájaro o incluso el barrio donde vive, basándose en el dialecto típico del trino — este tipo de canto es de las afueras de tal ciudad, o de la parte sur de tal otra ciudad. Así, en un pájaro normal, el niño genérico se modifica en la juventud, por aprendizaje y por las propiedades intrínsecas del animal en particular (no todos los cerebros son exactamente iguales, de pájaro a pájaro) (Scharff y Nottebohm, 1991; Nordeen y Nordeen, 1993). Resulta que dentro de ciertas agrupaciones, algunos pájaros cantan mejor que otros, por lo que tienen mayores posibilidades de reproducirse (Tchernichovski y Nottebohm, 1998). Además de emplear el cerebro, el trino es toda una ejecución motora, siendo por tanto un buen indicador del estado de salud del animal, así como de la originalidad de su actividad cerebral. De hecho, hay competitividad entre cerebros, pues los pájaros inventan, transmutan y hasta se roban las variaciones de sus congéneres. La duración y complejidad de los trinos es variable pero, en general, en cuanto más larga y más compleja, mejor. Los ornitólogos han descrito cómo se desarrolla determinado trino antes de que el pájaro se aparee, cómo alcanza su máxima madurez y elaboración en la estación de apareamiento y cómo lo reinventa al siguiente año con diversas variaciones (Nottebohm, 198 Ib; Nottebohm et al, 1986; DeVoogd, 1991; Jonson y Bottjer, 1993; Clayton, 1997; Nordeen y Nordeen, 1997; Smith et al, 1997; Money, 1999; lyengar et al., 1999). En el siguiente año, el macho tendrá que inventar un nuevo trino porque el antiguo queda obsoleto una vez utilizado. Es la planificación del deterioro en la naturaleza. Las hembras reconocen el trino del macho del año pasado, e instintivamente saben que esa ave está en decadencia. Igual sucede con cualquier otro campeón: el ascenso, la cúspide y el descenso, inevitables en el reino biológico. En este caso, la grandeza y la miseria del pájaro se manifiestan en la novedad o antigüedad del canto (figura 7.3).

¿Pero es el trino de las aves en realidad un PAF y, en tal caso, cuál es su relación con los ganglios basales? Si se elimina la testosterona (hormona masculina) en pájaros machos, se observa una reducción de tamaño en los ganglios basales, desaparición en algunas especies (ver Nottebohm, 1980) o reducción del canto (Arnold, 1975 a, b). Si se suministra testosterona a hembras a las que nunca se les había ocurrido cantar, lo harán por primera vez (Nottebohm y Arnold, 1976; Kling y Svenson-Hinde, 1977; Nottebohm, 1980; DeVoogd y Nottebohm, 1981; Schlinger y Arnold, 1991; Rasika et al, 1994; Nespor et al, 1996) y, en especies de aves cuyas hembras pueden cantar, desarrollarán un trino diferente: ¡de macho! (Gahr y García-Segura, 1996). El canto, tanto de machos como de hembras, se basa en la generación de nuevas neuronas y de conexiones en los ganglios basales (Nordeen et al,, 1992; Rasika et al., 1999, para el desarrollo normal del macho, y Schlinger y Arnold, 1991, para cambios en hembras inyectadas con testosterona). Así pues, se tiene un prototipo, de hecho un arquetipo de PAF de origen intrínseco.

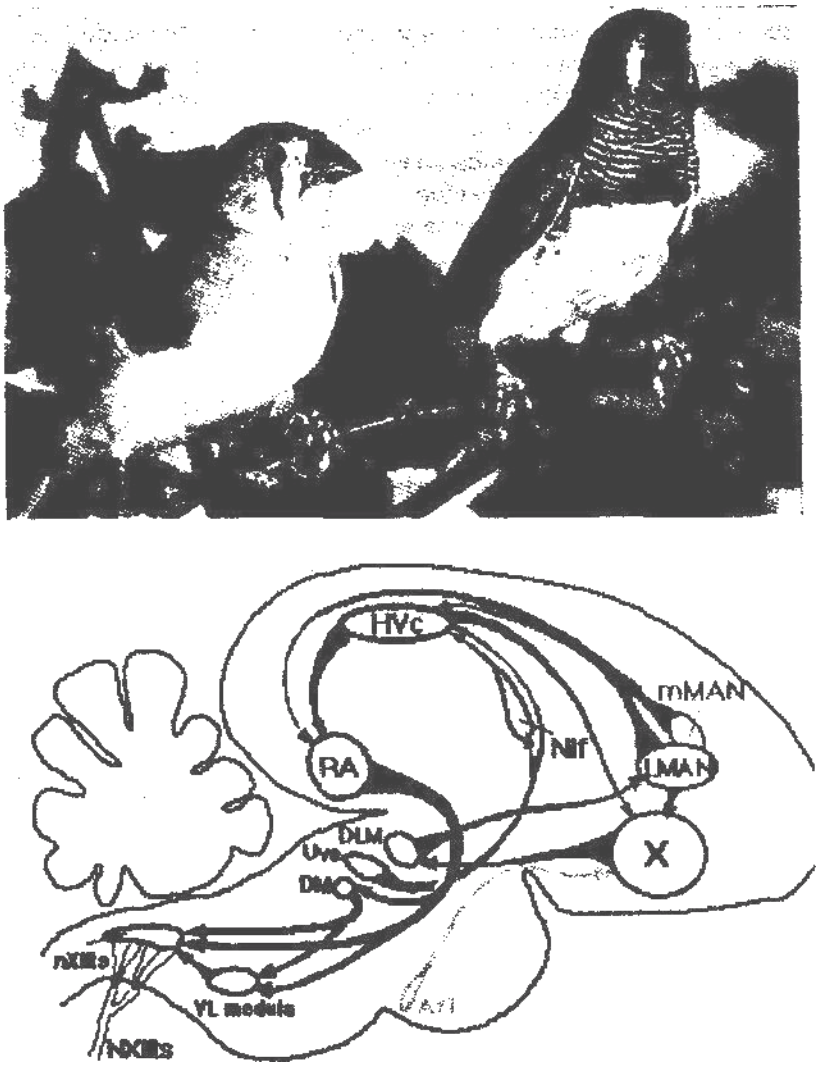


Figura 7.3

Trino de las aves como PAF modificables. (Arriba) Pinzón cebra hembra (izquierda) y macho (derecha), Taeniopygia guttata. (Abajo) Esquema de cerebro del macho y circuito de canlo en sección sagital o corte según su eje longitudinal, que muestra toda la extensión rostro-caudal. Se indican los núcleos que forman la vía motora de producción del trino, que descienden del CSV (centro superior vocal) por el NRA (núcleo robusto arquiestriado) hasta el núcleo XII (nervio hipogloso) y de ahí a la siringe. Así mismo, se indican algunos núcleos involucrados con el aprendizaje del trino: CSC hasta X (área X), NDL (núcleo dorso lateral del tálamo) y NMLNA (núcleo magno celular lateral del neoestriado anterior) hasta el NRA (ruta no indicada en la gráfica). También se muestran: el NDM (núcleo dorsomedial del núcleo intercolicular del mesencéfalo; la Uva (núcleo uveiforme del tálamo); el Nif (núcleo interfacial del neoestriado): el AVT (área ventral de Tsai del mesencéfalo). El CSc,. el NRA y el área X no siempre están presentes en especies cercanas que no emiten vocalizaciones complejas. (Diagrama por cortesía de Heather Williams.)

La hembra puede no haber oído jamás el trino (de hecho, la testosterona también induce el canto en hembras criadas en aislamiento), y será capaz de generar un patrón bien definido de motricidad que coordine sinergias muy específicas de musculatura laríngea, abdominal, intercostal y, en resumen, de la musculatura necesaria y suficiente para generar el trino. La expresión del PAF completo, el trino de base de determinada especie de ave, aparece con el suministro de la hormona adecuada. Lesiones en los ganglios basales eliminan irreversiblemente el canto normal de aves machos intactos y hembras inyectadas con testosterona (Doupe y

Konishi, 1991; Scharff y Nottebohm, 1991). Vemos pues, que en la hembra, se libera un PAF fenotípicamente latente, pero que genotípicameme era completo y complejo. Este módulo de función motora se encuentra en el "cableado" cerebral desde el nacimiento y se activa por efectos de la testosterona, de manera natural en el macho y experimentalmente en la hembra.

Pero si sólo los machos cantan normalmente, no es claro por qué el PAF persiste en las hembras; lo que sí es claro es que en el cerebro hay "muchas cosas viejas" por ahí. Evidentemente no resulta fácil identificar o analizar la secuencia evolutiva que produjo esta organización en la hembra, para que, en aras de conservar energía, eliminara un componente innecesario y costoso. Parece que fue más fácil y más barato dejarlo ahí.

Los desórdenes de los ganglios basales revelan su relación con los PAF

En el ámbito de la neurología humana, muchas enfermedades ilustran la relación entre ciertos PAF y los ganglios basales. A veces la neuropatología de estos núcleos puede producir un exceso de PAF, como en el síndrome de Tourette, o un déficit que a la larga lleve a su total desaparición, como en el síndrome de Parkinson. En personas con el síndrome de Tourerte, cuyo diagnóstico es una destrucción parcial de tos ganglios basales, se liberan continuamente PAF fuera de contexto y muy particulares (Coffey et al., 1994; Saint-Cyretal-, 1995; Roberrson y Stern, 1997; Saba et al., 1998». Estos pacientes se caracterizan por su incesante teclear con los dedos, hablar continuamente, mover los brazos a toda hora e incapacidad de quedarse quietos; en resumen, es el individuo típicamente hiperactivo. Son personas nerviosas e inquietas, en general intelectuales, a menudo atléticas, que responden muy rápidamente a estímulos sensoriales relacionados con la motricidad (coordinación ojo-mano, por ejemplo). Son ingeniosas e irascibles, siendo el pensamiento mesurado o tranquilo ajeno a ellas. Todo lo anterior trae a colación la actividad motora automática, su supresión normal y, bajo condiciones patológicas muy selectivas, su liberación anormal e involuntaria.

Al terminar un acto motor o al verse interrumpido en el curso de una acción, el paciente de Tourette, por su misma neuropatología, se ve obligado a continuar el acto, pero lo hace gritando palabras, generalmente improperios cortos. Esta persistencia involuntaria de la actividad motora se convierte en un arma contra sí mismo. En un ascensor lleno de gente, donde por razones sociales los actos motores deben inhibirse (agitar los brazos, teclear con los dedos, silbar en alto) tal restricción aumenta las dificultades del paciente de Tourette. En este caso, la falta de inhibición libera (siempre hay una grieta en la presa, por donde el agua Huye) y se traduce en la utilización de palabrotas que generalmente "no vienen al caso en un ascensor".

El "balismo", derivado de la palabra balístico, es otra afección semejante al síndrome de Tourette (Berardelli, 1995; Yanagisawa, 1996). Se caracteriza también por una liberación anormal e involuntaria de PAF, que se debe a lesiones específicas en ciertos núcleos de los ganglios basales. Mientras que el paciente con Tourette tiene que completar la actividad motora con palabras, bajo circunstancias semejantes, el paciente con balismo se caracterizará por el aleteo espontáneo de los brazos (el lector tal vez recuerde la extraña afección motora del doctor Strangelove en la película de Stanley Kubrick titulada en español *¿Teléfono rojo? Volamos hacia Moscú).* Las manifestaciones particulares de estos síndromes señalan muy claramente que ciertas actividades motoras se organizan funcionalmente en módulos.

La enfermedad de Parkinson también se relaciona con los ganglios basales, sólo que se expresa de manera opuesta a la observada en los pacientes con síndrome de Tourette (figura 7.4). Esta neuropatía se debe a una degeneración selectiva de una porción del *locus niger,* uno de los componentes del complejo de núcleos basales (ver Colcher y Simuni, 1999; Olanov y Tatton, 1999), y se caracteriza por inmovilidad racial, improductividad y lentitud de pensamiento, que se conoce como bradifrenia (Kutukcu *et al,* 1998), lo cual es exactamente opuesto a lo observado en el síndrome de Tourette. En estos pacientes lo anterior cursa con pobreza de emociones, que los hace casi carentes de modulación motora o emocional (Benke *et al.,* 1998). Los pacientes con Parkinson sufren de extraordinarios problemas para moverse y dificultades increíbles para iniciar

movimientos espontáneos o voluntarios tan sencillos como rascarse, lo que hace patente la *incapacidad* para liberar los PAF.

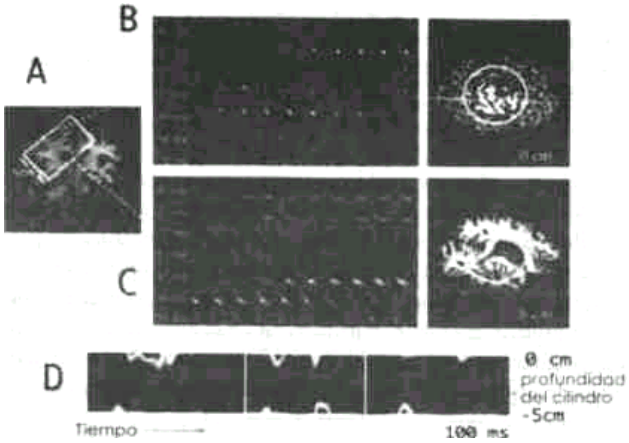


Figura 7.4

Base neural del temblor parkinsoniano ilustrado mediante tomografía de campo magnético (TCM). Lo TCM se empleó para definir lo distribución témpora-espacial de la actividad cortical durante el temblor de reposo (una única contracción del músculo digirorum superficialis *flexor* de lo mano). Los resultados confirman los brotes rítmicos del tálamo y de la corteza sensomotora asociados con el temblor. Para coda ciclo de temblor, el patrón de actividad sería como sigue: el temblor se inicia en el tálamo 30-40 microsegundos antes de que se activen los músculos. Aproximadamente 5-10 microsegundos después de lo activación talámica. se observa la activación de la corteza promotora y posteriormente de lo corteza sensomotora cuya salido impulsa la contracción del músculo flexor que inicia el temblor. *(A)* la imagen de la izquierda es un corte coronal de RN en la que el rectángulo indica la región estudiada (cilindro de 5 cm de ancho). (B. C. *izquierda):* dos series de datos. Una de ellas representa la actividad registrada en un corte virtual en el borde externo del rectángulo (arriba) y la otra indica la actividad en un corte en el borde interno (como se indica abajo), Los círculos representan un punto en el tiempo. -40 ms indica algún evento registrado 40 microsegundos antes de la activación muscular y 2 ms indica el tiempo transcurrido tras el inicio de la activación muscular. De izquierda a derecha, las columnas representan la actividad asociado con temblores subsiguientes. (*B. C. derecha)*

Reconstrucciones tridimensionales de RN de las regiones correspondientes al corte más externo y más interno. Th. tálamo. (D). Representación simultánea del patrón de actividad dentro del cilindro de 5 cm, .que ilustra la ritmícidad del temblor. (Tomado de Volkmann *et* al, 1996. figura 6. p. 1367.)

Las manifestaciones de estos dos síndromes y de otros trastornos relacionados con los ganglios basales sugieren que los PAF probablemente se implementen en el ámbito de los llamados ganglios basales y sean puestos en contexto por la conexión de salida de estos ganglios hacia el siempre activo sistema tálamo-cortical.

Ya mencioné que los ganglios basales envían y reciben información del tálamo. De hecho, el complejo intralaminar talámico (recordemos el capítulo 6) proyecta de manera extraordinariamente densa a los ganglios basales, de donde se deduce la idea de una interacción fisiológica entre el "sí mismo" y los PAF. Se trata de un problema muy importante, pues de hecho es el punto central del presente capítulo y no es fácil entenderlo en detalle. Prosigamos pues, para llegar a él.

Los PAF y el ahorro de elecciones

Una vez aclarado —ojalá— en qué consisten los PAF, me gustaría volver al problema de la autolimitación intrínseca de los programas motores. En el capítulo 2 se vio que el sistema motor es hipercompleto, por lo cual resulta intuitivamente lógico que se autolimite. Ya vimos que por su arquitectura inherente, el sistema puede implementar un movimiento dado en un número prácticamente infinito de formas (recordemos las diferentes maneras de alcanzar la botella de leche). Desde la perspectiva del sistema nervioso central, cabe preguntarse cómo cumplen los animales con sus deseos o metas particulares, dado que a menudo es posible llegar a estas metas u objetivos a través de un número asombrosamente elevado de estrategias. ¿Cómo se toman las elecciones, las *elecciones correctas?* Es obvio que éstas son indispensables para sobrevivir, por lo que se piensa que la selección natural haya dispuesto en el sistema nervioso algo que afine y engrane un mecanismo que reduzca el número de posibles elecciones. Examinemos lo anterior en detalle.

Teóricamente, se comprende que el sistema nervioso puede diseñar dos tipos generales de estrategia. En la primera dejaría al sistema en completa libertad y en la segunda lo dotaría de un mecanismo intrínseco que reduzca el número de tales elecciones. Por libre entiendo que si una gacela ve llegar a un tigre, puede decidir correr brincando de la manera esperada, o con sólo tres de sus cuatro patas o con dos patas hacia adelante y dos hacia atrás. El problema de una operación completamente libre, con posibilidades infinitas, es que resultaría muy costoso para el sistema. Por ser hipercompleto, necesita un mecanismo eficiente que reduzca sus grados de libertad, ya que sus elecciones son verdaderamente críticas. No sólo sería ineficiente, sino potencialmente letal pasar demasiado tiempo deliberando cómo escapar del tigre. Un sistema que implemente inadecuadamente la fuga, como sería, por ejemplo, intentar primero movimientos natatorios estando en la tierra, fácilmente llevaría a la muerte.

Vemos pues, que la selección natural llegó a un sistema que opera mediante la reducción de sus elecciones. Por su riqueza y su característica de ser hipercompleto, para implementar efectivamente las acciones motoras, el sistema motor tiene *necesariamente* que disponer de tal estrategia global, ya que el tiempo de su ejecución se vuelve imperativo. Dada su importante relación con los PAF, los patrones deben responder un tanto selectivamente ante eventos urgentes del entorno que exigen que haya *estrategias* explícitas, bien definidas, como el ataque y la defensa, la búsqueda de alimento, la reproducción y demás, que se realicen sincronizada y apropiadamente. Los eventos de esta naturaleza deben ser impuestos sobre un sistema que es extraordinariamente rico y predictivo, por lo cual deben ser muy poderosos. Así, las aves en su evolución no gastaron tiempo tratando de volar, aleteando con una sola ala. Obviamente, ya en el aire, el pájaro podrá y tendrá que cambiar su PAF de vuelo, pero en el origen mismo, en el momento de expresar este PAF "pre-diseñado", la selección natural impone una clara limitación para hacer lo correcto: aletear con ambas alas. Al observar cómo se bañan las aves, resulta claro que pueden aletear sólo con un ala, pero esto no es volar. El sistema motor en un momento dado está limitado a un PAF particular (entre muchos otros), de modo que se active de manera perfecta en el momento necesario.

Desde el punto de vista fisiológico, los PAF reducen el inmenso número de grados de libertad del sistema. En el capítulo 2 se mencionaron las sinergias musculares, la coactivación de grupos musculares específicos en una combinación coordinada para ejecutar cierta tarea motora, cosa que se ilustró con el ejemplo de alcanzar algo con la mano. El aleteo en los pájaros es igual: este PAF también requiere la activación sincrónica y coordinada de diversas sinergias musculares muy específicas. Este evento motor se impulsa por disparos sincrónicos y coordinados de aquellas neuronas motoras, cuyos patrones de disparo, frecuencias y duraciones son específicas para el vuelo. El resultado de que la evolución forjara por ensayo y error la asombrosa hazaña de eliminar del sistema un número casi infinito de otros patrones neuromotores de activación, llevó a la creación de los PAF, esos módulos relativamente específicos de función motora.

Los PAF tienen dos componentes: estrategia e implementación táctica

En lo referente a los PAF, existen dos aspectos *muy* importantes concernientes a las limitaciones impuestas sobre el sistema motor. Uno de ellos es la estrategia, que se relaciona, como ya dijimos, con problemas globales, con la elección de categorías muy generales como luchar o huir, ya que no se pueden hacer ambas cosas al mismo tiempo. Sin embargo, la estrategia también debe contextualizarse según los eventos del entorno del animal en un momento dado, razón por la cual los PAF tienen dos componentes. El primero es el componente estratégico ya mencionado y el otro es la implementación de tales estrategias dependiente del contexto: la *táctica* (figura 7.5). Ambos componentes se entrelazan íntimamente y se consideran eventos premotores (capítulo 2). El *hecho* de escapar del tigre no crea la necesidad de hacerlo, pues ésta proviene de la urgencia sentida, que se percibe momentáneamente en el mundo externo. Tal urgencia se procesa en el ámbito premotor predictivo *(debo* correr) y posteriormente se implementa la solución táctica del PAF apropiado: corro. En esta decisión global, la evaluación táctica determina que lo mejor es mover las piernas de modo que pueda correr lo más rápido posible, *alejándome* y no *acercándome* al tigre, que es como manda la estrategia. Esto parece obvio pero, para sobrevivir, el cerebro debe implementar correctamente todos estos aspectos. Toda decisión tiene dos niveles: estrategia apropiada y, dentro de ésta, táctica apropiada. Una rana puede decidir saltar cuando ve acercarse las luces del automóvil. Sin duda es una buena táctica, pero dado el número de desdichadas ranas que se ven aplastadas en la carretera, es posible que la estrategia de saltar *alejándose* del automóvil no siempre se implemente a tiempo o de manera correcta. El trabajo de la selección natural nunca termina.

En lo referente a los PAF, es importante aclarar bien la diferencia entre estrategia y táctica. Digamos que soy un jaguar. Hay un enemigo y opto por la estrategia de quedarme y luchar. Pero, para definir la táctica contextual, es crítico saber *cuales* el enemigo: en cuanto a PAF motores se refiere, luchar con una serpiente difiere mucho de luchar con otro jaguar. Esta decisión en dos niveles y la consiguiente implementación estratégica y táctica son válidas para todos los organismos con sistema nervioso, desde los más primitivos hasta nosotros.

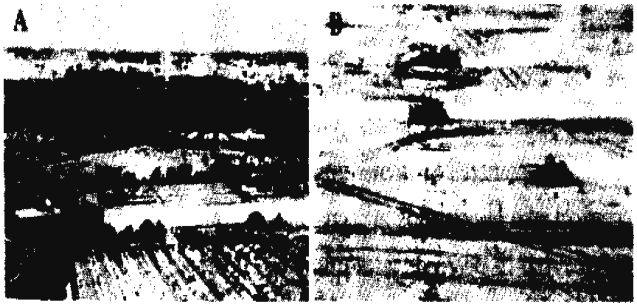


Figura 7.5

Estrategia versus táctica. *(A)* Estrategia: El Pentágono, cuarteles generales del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, centro de la estrategia militar. (*B)* Táctica: tanques del Cuerpo de Infantería de Marina: 2º Batallón de tanques de la 2ª División de Infantes de Marina durante un ejercicio táctico de armas combinadas en el Centro de Combate de Aire y Tierra del Cuerpo de Infantes de Marina, Twentyníne Palms, California, 1 ° de febrero de 2000.

Si alguien se encuentra en una callejuela oscura y teme por su integridad, comienza a correr y a buscar en qué dirección escapar. En este ejemplo, ya se optó por una estrategia. En cuanto a la táctica: ¿correrá la persona hacia el final de la callejuela, o se subirá por una escalera de incendios? La estrategia escogida sería el evento macroscópico y la táctica implementada seria el componente microscópico, la resolución detallada de la respuesta.

Si se entiende lo anterior, se deduce que primero los *VAS* se activan como una secuencia y luego esta se contextualiza con el entorno presente. No tiene que ser una situación tan complicada como la que le pusimos al jaguar, a la gacela o incluso a nuestra pobre rana. El perro de la esquina tiene comida en el plato, pero también le escuece la oreja izquierda. ¿Se rascará primero o comerá primero? Es obvio que no puede hacer ambas cosas. Así, este tipo de activación implica que el sistema nervioso opte por eventos globales, *escogiendo una y descartando momentáneamente otro, o quizás muchos otros.*

En un plano fisiológico completamente diferente, el modo de examinar los objetos del mundo que nos rodea sirve también de ejemplo. Cuando algo llama la atención en la periferia del sistema visual, nos sentimos obligados a dirigir la mirada hacia allí, distrayéndonos momentáneamente de nuestro propósito visual previo. Esto se logra fácilmente moviendo los ojos, junto con la cabeza, el cuello, las caderas, e incluso los tobillos y los pies según el caso. Para orientar el cuerpo, efectuamos una aproximación general hacia la meta, tras de lo cual implementamos una actividad completamente diferente, pues ahora se trata de llegar al objetivo — el problema es de *táctica.* En el caso de los movimientos oculares, es necesario mover los ojos para que el objeto de interés quede en el centro del campo visual, y sólo entonces se comienza a "fovear" (si es que el lector es un animal que "fovea"). La "foveación" implica aumentar el nivel de agudeza visual utilizando la fóvea de la retina. La fóvea es el área visual de mayor sensibilidad espacial y consiste casi exclusivamente en fotorreceptores de tipo cónico. Al observar algo que nos gusta, digamos un mural interesante, son muchas las partes en las que podemos detenernos, por lo cual, según el entusiasmo del momento, tendremos que decidir con cuánto grado de detalle deseamos mirar, porque finalmente mirar es una manera sutil de *tocar. Así,* vemos de nuevo el funcionamiento de la estrategia y dentro de ella, de la táctica.

Este último ejemplo lleva a un problema crucial: el dispendioso equilibrio entre la imperiosa necesidad de un proceso que reduzca de manera sustancial (y útil) los grados de libertad, las posibles elecciones que el sistema toma o implementa y la necesidad fundamental de libertad *para* realizar dichas elecciones. Tenemos aquí otra diferencia entre la estrategia y, dentro de ésta, de la táctica, lo cual constituye la diferencia entre una respuesta refleja y una elección volitiva.

Si algo nos llama la atención en la periferia, movemos los ojos para que el objeto quede aproximadamente en el centro del campo visual. Esta estrategia global del sistema es claramente un PAF, pues es una respuesta refleja y bien delimitada; de no serlo, el reflejo generaría movimientos oculares demasiado amplios o demasiado cortos. Con el fabuloso cuadro que nos gustó en el centro del campo visual, entra en juego la táctica: decidir qué parte deseamos mirar y "fovear" (figura 7.6). Esta táctica no es un PAF; es voluntaria y por tanto implica una elección consciente. ¿Qué parte miraremos? Otro punto muy importante consiste en que la táctica inhibe al PAF; lo libera de su rigidez. Si encuentro que una esquina del cuadro es muy llamativa visualmente, de seguro lo que se halla en este momento en mi visión periférica seguirá allí. Lo que típicamente ocasionaría una mirada refleja hacia alguna otra área (estrategia), se inhibió voluntariamente. ¡Perdón, pero en este momento estoy "foveando" un detalle que me interesa!

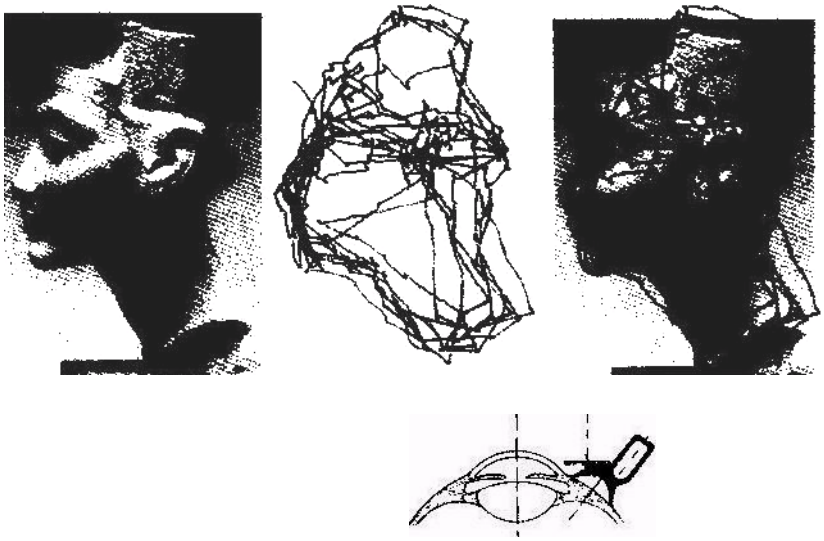


Figura 7.6

Registro de los movimientos oculares (mitad) generados al examinar el perfil del busto de Nelertiti izquierdal. Cada movimiento de ojos registrado es volitivo y balístico- (Derecho) El registro de los movimientos oculares se superpuso sobre el objeto. !Abajo¡ Aparato que mide los movimientos oculares con la cabeza fija. (Adaptado de Yarbus-1967; arriba figura 116, p-181; abajo, figura 13.P-30.)

Así los PAF reducen el enorme número de elecciones, o de grados de libertad del sistema, pero no alteran la capacidad de fragmentar o de modificar este operativo limitante, que es también la habilidad de escoger — la táctica voluntaria dentro de una estrategia dada.

Aclaremos lo anterior con un último ejemplo. Alguien va caminando y se resbala en un suelo enjabonado. Las piernas se van hacia adelante y la persona está por caer. Inmediatamente e sistema motor adopta una estrategia que automáticamente activa un PAF reflejo., En un comienzo, los brazos se mueven hacia arriba y hacia fiera para equilibrar el cuerpo y posteriormente se balancean hacia atrás y hacia abajo para frenar la caída. Este PAF impide que el sistema opere con total libertad y automáticamente señala e implementa la respuesta compensatoria correcta según las circunstancias físicas. Como durante la selección natural se han visto muchas caídas, no es ningún misterio que se haya desarrollado este PAF protector. El individuo, el “sí mismo”, no tiene tiempo de reflexionar e impulsar voluntariamente las sinergias musculares que inventen de novo este evento motor protector. Es así como la selección natural identificó lo que debe hacerse, cuando el organismo está por caer, perfeccionándolo a través de milenios, en módulos específicos que, en general, se activan en circunstancias motoras muy específicas: “tengo las piernas más arriba que la cabeza y estoy rodando boca abajo”. Los PAF son muy buenos amigos del «sí mismo”.

¿Pero por qué los PAF son tan fijos? Devolvamos la cinta al preciso comienzo del resbalón, cuando las piernas se deslizan hacia adelante, sólo que esta vez tengo en la mano el invaluable jarrón etrusco de mi madre.

Si el PAF en cuestión fuese realmente fijo, como el de la rana a la cual le escuece la espalda, se atajaría la caída y probablemente, medio segundo después, el jarrón se haría trizas en el sitio adonde, corno parte del maldito PAF involuntariamente lo hubiera lanzado al resbalar.

Pero d jarrón no tiene precio y además pertenece a mi madre. El PAF no lo sabe, pero yo sí. Pese al PAF conocemos exactamente el desenlace de esta situación. Caeré de lleno en el trasero, sujetando con las manos el jarrón que probablemente quedará intacto en mi regazo.

Entonces, ¿qué sucedió? ¿Sería que el PAF “apropiado” no se liberó o activó? Ciertamente lo hizo —ya dije que es automático y muy rápido. ¡Ah! pero también son las propiedades

predictivas del cerebro. EI resbalón y la caída no son nada nuevo para el sistema tálamo-cortical (recuerda el lector el capítulo 3 cuando dije que para integrar debemos movernos en el mundo?), por lo cual es fácil y automático predecir las consecuencias. Tengo la imagen predictiva sensomotora: si intento no caerme, el jarrón se hará añicos. ¿La solución voluntaria? Me dejo caer, es decir, inhibo tácticamente el PAF, elimino conscientemente su curso de acción estereotipado: ¡sostengo ese jarrón a toda costa! Si aún no estamos seguros de que el PAF que impide la caída se hubiera activado inicialmente y después se hubiera cancelado, pensemos en situaciones semejantes en las que nos hayamos encontrado yen la dificultad de ajustar los movimientos durante la caída: agarrar el jarrón o la taza de café.

Hagamos un breve resumen. Tenemos un sistema motor que, al ser impulsado por estrategias globales, implementa los PAF en el contexto apropiado en el que deben darse y cuya precisión se debe a que el elevado número de posibles elecciones se reduce inmediatamente. La estrategia adoptada por el sistema determina lo anterior. En buena parte, estos PAF vienen con el "cableado" innato, por lo cual su activación constituye algo equiparable a los reflejos. Como módulos de función motora automática, la evolución los formó y los perfeccionó para ahorrar tiempo (de cómputo), como un eficiente antídoto contra un sistema motor enormemente hipercompleto; por su sincronía con la activación contextual y su fiabilidad en la ejecución, los PAF le ahorran tiempo al "sí mismo", el sustento de la predicción. Sin embargo, una vez activados, la expresión motora estereotipada de la mayoría de los PAF puede modificarse tácticamente, según las exigencias del contexto. Este "escape" o cancelación de un evento motor, limitado por el PAF en ejecución, se logra mediante el sistema tálamo-cortical, el "sí mismo". Este sistema toma elecciones volitivas, ponderando la información y anticipando las consecuencias en un contexto evolutivo. Para que las respuestas del repertorio motor no sean fijas, se necesita del advenimiento de la conciencia.

El lenguaje como PAF promotor

Para concluir el capítulo, deseo señalar algo que trataré en mayor detalle en el capítulo 11, en otro contexto. Es interesante ver cómo en el síndrome de Tourette se observan los mismo síntomas (palabrotas) en todas las personas de todas las lenguas, lo cual sugiere algo fascinante respecto de la generación del lenguaje en el cerebro. Es decir, el lenguaje mismo es un PAF y, además, es un PAF premotor íntimamente relacionado con la actividad de los ganglios basales. Esto lo sugieren los síntomas clínicos de por lo menos una paciente examinada por mí junto con otros colegas, y de quien hicimos un estudio titulado "Palabras sin mente" (Schiff et al 1999). Realicé este estudio junto con mis colegas Fred Plum y Nicholas Schiff, distinguidos neurólogos de la Escuela de Medicina de la Universidad de Cornell y con mi amigo y colaborador Urs Ribary quien, como yo, pertenece a la Escuela de Medicina de la Universidad de Nueva York. En la paciente en cuestión, un accidente cerebro vascular masivo no dejó prácticamente ningún área cerebral intacta, excepto parte de los ganglios basales y el área cortical izquierda, la cual se conoce como área de Broca, responsable de los aspectos motores del lenguaje. El "derrame" también dejó intactas algunas partes del tálamo, de modo que, junto con parte de los ganglios basales y el área cortical de Broca, compartían ciertos circuitos interconectados (véase la figura 3 del capítulo 11). Esta persona se ha en coma desde hace 20 años y todas las medidas objetivas y el diagnóstico radiológico, así como otras medidas no invasivas, indican que la mayor parte del cerebro está funcionalmente muerto. Sin embargo, pese a hallarse en estado vegetativo, ocasionalmente genera palabras (figura 7.7).

Se trata, pues, de alguien que perdió todas sus capacidades, excepto la de generar palabras, la cual se halla intacta. Lo anterior corrobora que el sistema nervioso parece estar organizado en módulos funcionales. En este caso, la generación de palabras es una propiedad intrínseca del cerebro. Es muy triste que alguien emita palabras al azar, sin ninguna conciencia subyacente al PAF que las produce. Sin embargo, el drama opuesto es igualmente posible y quizá aun más aterrador. Tras ciertas lesiones, el individuo comprenderá el lenguaje y la prosodia, podrá ver y

oír e interactuar con el mundo externo, excepto que será incapaz de generar palabra Pero de nuevo, lo importante es que estos casos claramente apuntan hacia una organización modular de la función del sistema nervioso.

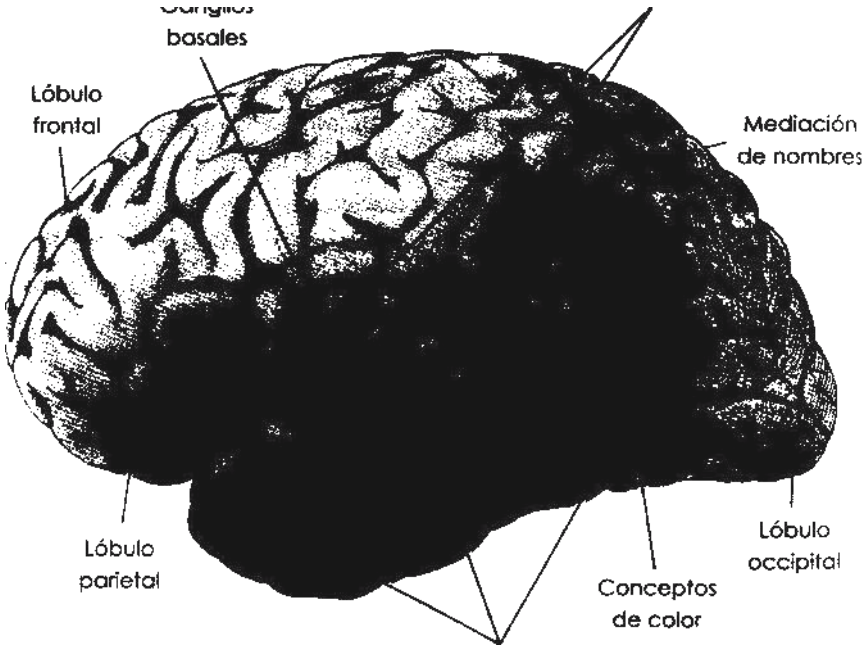


Figura 7.7

Localización del lenguaje en el Cerebro. El hemisferio izquierdo abarca las estructuras que implementan palabras y frases y que median en diversos aspectos léxicos y gramaticales. El conjunto de estructuras neurales que representan los conceptos propiamente dichos se distribuye en el hemisferio derecho e izquierdo en numerosas regiones sensoriales y mataras. (Tomado de Domasio y Damasio. 1992, p.92.)

Los PAF pueden modificarse, aprenderse, recordarse y perfeccionarse. ¿Cómo hace el cerebro para aprender y recordar las cosas? ¿El “sí mismo”? Examinaremos estos problemas en el capítulo 9.

R. Varo, Locomoción capilar, 1959, Óleo/masonita, 83 X 61 cms.

8

LAS EMOCIONES COMO PAF

Siempre resulta saludable abordar el problema de las emociones con una buena dosis de reverenda, pues pocos tópicos de investigación presentan tantas aristas como el mundo afectivo. En el hecho de que, siendo en buena parte irracionales, las emociones pueden esclavizar la racionalidad (véase a Hume), es posible que se encuentre la raíz de este espinoso problema. En su favor puede decirse que las emociones son la razón de nuestro deseo de sobrevivir y de nuestra inspiración. De hecho, las propiedades y vicisitudes del yo emocional constituyen lo que conocemos como nuestra “humanidad”. Estos problemas tienen una larga historia caracterizada por una tradicional incomprensión de los motivos humanos. De Helena de Troya recordamos que fue “el rostro que lanzó mil barcos a la guerra” en la legendaria Ilíada de Homero, lo cual constituye un buen ejemplo de irracionalidad. Probablemente no fue ni la cara ni otra característica anatómica de Helena lo que movilizó la flota de Agamenón contra Troya, sino quizás el amor propio y el orgullo herido.

Entonces, ¿cómo abordar un tópico tan complejo? Propongo considerar las emociones como miembros de la categoría de "patrones de acción fijos" o PAF cuya ejecución no es motora sino promotora. Además, así como el tono muscular sirve de plataforma básica para ejecutar movimientos, las emociones representan la plataforma premotora que impulsa o que frena la mayoría de nuestras acciones. Pero, al contrario del tono muscular, en el cual el parámetro regular es el nivel de activación muscular, las emociones se caracterizan por su variedad. Si reflexionamos sobre la historia de la humanidad en la tradición occidental judeocristiana, encontramos buenas caracterizaciones de los estados emocionales, según las cuales éstos se describen como "pecados capitales" (orgullo, ira, ambición, lujuria, envidia, pereza y gula) y otros menos conocidos y menos emparentados con las emociones reales, como las "virtudes cardinales" (Justicia, prudencia, templanza y fortaleza) y las "teologales" (fe, esperanza y caridad). Según la actitud moderna, "las virtudes son en sí mismas su propia recompensa" (realmente intrínsecas), idea que derivaría o al menos reflejaría las necesidades prácticas en los orígenes de sociedades agrícolas sedentarias que, en esencia, se relacionarían con la noción de un "autointerés ilustrado".

Aparte de lo anterior, las emociones se cuentan entre las más antiguas propiedades del cerebro. Se efectúan en el rinencéfalo (ver Velasco et al., 1988, 1989), cuya actividad soporta y genera no sólo nuestros sentimientos emocionales, sino también un conjunto de posturas motoras, autonómicas y endocrinas, que probablemente evolucionaron para disponer a la acción y como maneras de señalización social de la intencionalidad. Desde el punto de vista de la neurología y de la ciencia, el problema de las bases neurológicas del mundo afectivo ha sido tema de investigaciones clásicas y contemporáneas (Brown y Schafer, 1888; Bard, 1928; Klüver y Buey, 1939; Hess y Rugger, 1943; Hess, 1953; Weiszcrantz, 1956; Hunsperger, 1956; Fernández de Molina y Hunsperger, 1959, 1962; Downer, 1961; Geschwind, 1965; Fernández de Molina, 1.991 Damasio. 1994, 1.999 ; Le Doux,1996; Rolls, 1.999), No sería de extrañar que los estados emocionales fueran simples respuestas estereotipadas comunes a todos los seres humanos. Así los estados emocionales cardinales (especialmente los pecados), son probablemente liberados por péptidos modulares, de tal manera que su caracterización universal puede ser reconocida por la mayoría de las culturas.

Las sensaciones son eventos Intrínsecos y las emociones son PAF globales sensoriales

La relación entre los estados emocionales y Ias acciones —y, por supuesto, la motricidad misma— es de suma importancia, pues, bajo circunstancias normales, los estados emocionales son disparadores de la acción y de su contexto interno. Pero el estado emocional subyacente, el "PAF premotor". no sólo desencadena la acción como un PAF, sino que además se expresa en forma de otros PAF motores (como algunas expresiones faciales) que telegrafían a los demás el contexto (motivación) y quizás la inminencia de la acción que debe sobrevenir. Sin embargo, es

posible generar artificialmente tales patrones motores sin contenido emocional alguno (figura 8.1), mediante el estímulo eléctrico de las ramas nerviosas motoras de la cara. Si, inadvertidamente, alguien toca una sartén muy caliente, retirará rápidamente la mano (un PAF) no sin antes haber generado algún gesto (un PAF motor) y una exclamación (otro PAF motor) (Darwin, 1.872). Sun embargo, así como sucede con los demás PAF, a menudo es posible suprimir la expresión emocional. G. Gordon Liddy, famoso durante Watergate, y hasta hace poco presentador de programas radiales, acostumbraba a impresionar a la gente en fiestas en Washington manteniendo la mano sobre una llama. "¿Cuál es el truco?", le preguntaron alguna vez. "Que no le importe a uno", respondió.

No es necesario invocar el sofisticado mundo emocional de Ios seres humanos para apreciar la inextricable relación entre emociones y acciones, pues incluso los PAF motores de animales relativamente primitivos se acompañan de un componente emocional bien definido. Tal elemento emotivo también se relaciona con el lema de los "cualias", que discutiremos en detalle en próximos capítulos.

Figura 8.1

Ejemplos de expresiones faciales generadas por estimulación selectiva de diversas combinaciones de músculos de la cara. (Tomado de Duchenne de Boulogne, 1862 (re-editado, 1990), placas 13, 31,65.)

Para generar un PAF motor, la información que lo desencadena debe amplificarse y contextualizarse un poco antes de su activación. ¡Hay un incendio! ¡Corran! Intuitivamente no tendría sentido ir emitiendo PAF por ahí, sin buenas razones, aunque no es necesario que la información que activa el PAF sea tan alarmante. Puede tratarse de una simple picazón, que en general es un estímulo minúsculo si se considera que toda la piel tiene inervación, por lo cual casi continuamente genera una actividad de fondo en toda la superficie del cuerpo. Ahora bien, pese a ser uno de los órganos sensoriales de mayor tamaño, reaccionamos agresivamente a este pequeño estímulo del zancudo, llegando a golpearnos en nuestro intento por matar al ofensor. La información sensorial en forma de zumbido o de leve picadura genera una breve reacción emocional, la cual activa un PAF motor: la palmada. Pero supongamos que alguien con aracnofobia ve que una araña se le pasea por el pecho, bueno... ¡ahí sí murió el jarrón de la mamá! Algo tan insignificante como la picadura de un zancudo o una araña que se pasea sobre el cuerpo puede evocar no sólo una respuesta sensorial, sino, de hecho, un breve estado emocional. Incluso una benigna picazón puede amplificarse hasta comportamientos maniacos, como bien lo saben los que han tenido una pierna o un brazo enyesados. En estos casos se intentará todo para detener la picazón, insertando dentro del yeso lo que este a la mano (agujas de tejer) para llegar a la perversa picazón y rascarse, y si no se logra alcanzar el lugar, se desencadenará un estado emocional frenético. Esta situación (estar enyesado) subraya la importancia de que la entrada sensorial pueda amplificarse hasta estados emocionales, produciendo así un contexto claro a partir del cual opera el sistema tálamo-cortical.

¿Qué se entiende, pues, por el término "estado emocional"? Me gustaría relacionar tales

estados, entre otras cosas, con PAF no motores, como veremos más adelante. Acordemos, por lo pronto, que los estados emocionales contextualizan el comportamiento motor; así, el dolor y el siguiente paso, el miedo, son estados emocionales. Aparentemente, la sensación de dolor se relaciona con cieno estado emocional, pero, ¿es el dolor en sí mismo un estado emocional? Yo diría que sí lo es. La activación de las vías cerebrales especializadas en dolor (nociceptivas) no lo genera en personas con lesiones en el lóbulo frontal, digamos, el cíngulum (área 24 de Brodmann) (ver Devinsky et al, 1995; Kuroda et al, 1995; Sierra y Berríos, 1998; Heilman y Gillmore, 1998). Quizás el paciente reconozca que el estímulo debería provocar dolor, aunque claramente carece de la calidad de "doloroso" que normalmente evoca en los demás. Si se le pregunta al respecto, responderá: "Sí, siento el dolor, pero no me duele". Aunque ésta no es la respuesta normal a un estímulo doloroso, es un claro ejemplo que ilustra cómo el dolor y la emoción generada por éste son eventos disociables. Podría usarse el argumento de que ambos, el dolor y el estado emocional que se le asocia, son separables, para respaldar el punto de vista de que el dolor y la emoción son generados separadamente. Esto sería así, si por dolor entendemos sólo la experiencia sensorial y no el malestar asociado. La mayoría de nosotros considera fundamentalmente el malestar del dolor y no lo que se le asocia. "Me dolió salvajemente. Pero también sentí el apretón en el pulgar cuando el martillo lo golpeó".

El cíngulum se activa generalmente ante dolores intratables, crónicos, como el del cáncer (Devinsky et al., 1995; Rainville et al, 1997; Casey, 1999) (figura 8.2). Lo interésame es que la corteza cingulada también se activa al cometer un error. ¡Ay, no! ¡No el jarrón! Pensándolo bien, un error u omisión lleva a una especie de dolor, a cierto estado emocional definitivamente muy particular, con el cual desgraciadamente todos estamos familiarizados. Debe resaltarse que, aunque muy profundo, éste último no es un dolor localizable, como tampoco lo es el sentimiento de dolor ante el sufrimiento o las desgracias de nuestros seres queridos. Al respecto, los pacientes psiquiátricos describen un tipo semejante de "dolor profundo". Llámese "dolor psicológico" o no, el hecho es que es un estado capaz de llevar al suicidio a muchas de estas personas. Lo importante es que no es localizable. De hecho no se puede localizar ningún dolor. Una cortadura en el dedo y el dolor asociado parecen localizados, pero esta localización simplemente es la coactivación del dolor y el estado emocional que produce con la estimulación general táctil. El malestar del dolor es un estado emocional generado por el cerebro (Tolle et al-, 1999; Treede et al, 1999) y no un evento que ocurre en algún sitio particular del cuerpo (Greenfield, 1995).

Dicho en otras palabras, los receptores periféricos y las vías neurales que generan la percepción central de dolor definen pero no son el proceso de generación del dolor (figura 8.2). Las sensaciones son eventos intrínsecos, un producto de la actividad en curso del sistema nervioso que logra filtrarse a la conciencia, y son verdaderamente intrínsecas, puesto que también se logran en ausencia de activación sensorial. Durante los sueños experimentamos muy diversas sensaciones (Zadra et al., 1998), aunque ninguna de ellas llega por las vías por las que nos llegan en la vigilia. En el capítulo 6 se mencionó que aunque estas vías sensoriales transducen los estímulos externos, durante los sueños el sistema tálamo-cortical no les otorga significado.)

Corteza primaria somatosensorial (SI)

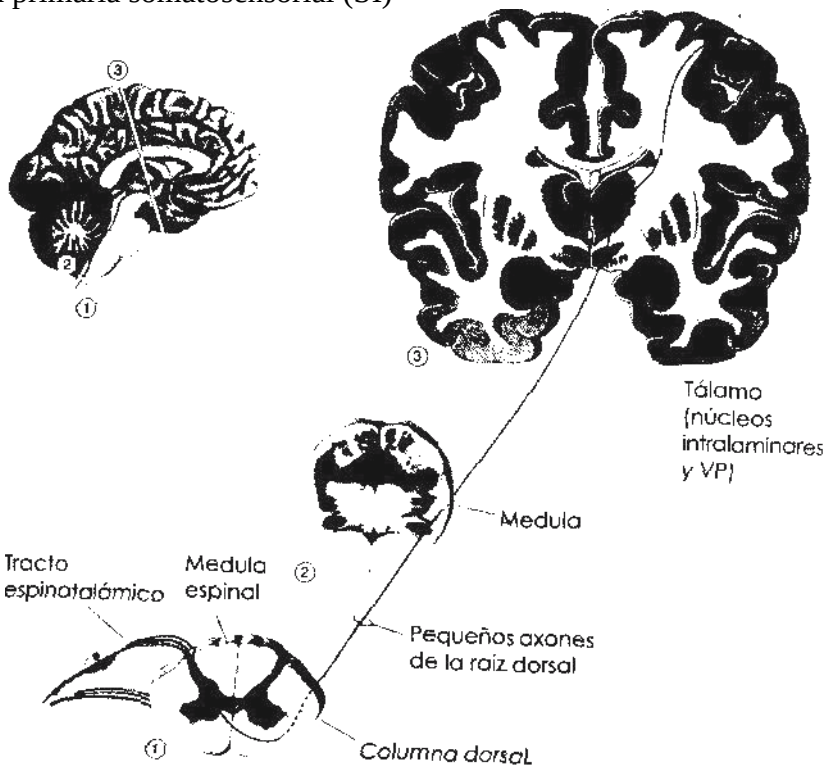


Figura 8.2

Vía spinotalámica de percepción del dolor. La información dolorosa es conducida de la médula espinal por el neuroeje hasta el tálamo y, de allí a la corteza primaria somatosensorial. Ver texto para detalles. (Tomado de Bear et al., 1.996, figura 12. 16, p. 328.)

Así pues, lo que sentimos durante un sueño es una total confabulación por parte del celebro, el cual y en este estado, por la activación de diversos sectores tálamo-corticales origina el mundo de los sueños. Las características de las sensaciones percibidas durante los sueños se explican porque se construyen en el contexto mismo del sueño. Si sueño que alguien me habla, oigo palabras, o si sueño que estoy cayendo al abismo, me sentiré caer y, sin embargo, en realidad mi cuerpo está tranquilo e inmóvil, dormido en la cama. Una prueba más de que las sensaciones son eventos intrínsecos del sistema nervioso está en el hecho de que en los sueños podamos volar con los brazos extendidos hacia los lados. Esta experiencia puede ser integral e incluir sensaciones de caer en picada, planear y sostenerse en el aire, con el viento y el frió o incluso la lluvia en la cara. El vuelo autónomo es algo que muy pocos de nosotros ha experimentado en la realidad de la vigilia, a través de la activación de las vías sensoriales. Pensando en esta materia, es buena idea separar a los agentes que conducen la actividad sensorial de los que ejecutan la sensación.

Las vías sensoriales no producen las sensaciones, sólo sirven para informar al contexto interno acerca del mundo externo; durante los sueños, ni siquiera hacen esto. En ambos estados, la sensación es un estructura funcional intrínseca del cerebro, dada por la actividad de éste dentro del contexto interno momentáneo de la actividad del sistema tálamo-cortical.

Desde este punto de vista, podríamos ver a las emociones como la sensación global de los PAF, si no como los PAF propiamente dichos. Las emociones se diferencian claramente del aspecto motor de los PAF, pese a que están íntimamente relacionados; de hecho, intuitiva y fisiológicamente, rara vez pueden separarse. Las emociones se relacionan con áreas ajenas a los ganglios basales, pero se asocian estrechamente con éstos (Saper, 1996; Heilman y Gilmore, 1998). También se relacionan con el aspecto motor de los PAF (funciones de los ganglios

basales), debido a sus conexiones con la amígdala y el hipotálamo y a su conectividad con el tallo cerebral (Bernárd et al., 1996; Beckmans y Michiels, 1996). Aunque están íntimamente conectados, me referiré por aparte al hipotálamo (o complejo hipotalámico, pues es un grupo de núcleos relacionados) y a la amígdala (o complejo amigdaloide, otro conjunto de núcleos interrelacionados).

Los PAF y la generación de estados emocionales

El hipotálamo

Hoy en día se sabe que los PAF implicados en eventos vegetativos y emocionales se desencadenan por activación hipotalámica. El hipotálamo es una estructura esencial para generar tanto emociones como actividades vegetativas y endocrinas. Esto es importante, porque los PAF que suelen acompañar los estados emocionales requieren que el sistema nervioso, además de generar el movimiento coordinado, modifique otros parámetros y sistemas del cuerpo (ver la revisión en Spyier, 1989). Así, ante una amenaza, el ave responde emprendiendo el vuelo, activando rápida y sincronizadamente los músculos del tórax, lo cual es indispensable para desplegar fuerza en las alas. Poco antes de esto, hay un enorme incremento en el flujo sanguíneo a los músculos pectorales. Sin éste, los músculos no dispondrían de suficiente oxígeno como para sostener el incremento en la fuerza contráctil y el animal no podría contrarrestar la inercia y remontarse en el aire. En el momento previo a ese PAF motor que conocemos un tanto retóricamente como vuelo, hay un aumento correspondiente de actividad del corazón y de la actividad respiratoria (¡que en sí misma es un PAF motor en curso!). Así pues, vemos que la generación de un PAF se acompaña de un control igualmente complejo y sincronizado de la activación de muchas funciones corporales necesarias para ejecutado de manera adecuada.

Como un interruptor maestro, el hipotálamo regula todos estos mecanismos, sin los cuales no se daría el componente motor y cognoscitivo, o sea el aspecto consciente, emocional, de la respuesta (Sudakov, 1997) (figura 8.3). El hipotálamo suministra el vínculo fisiológico entre el estado emocional —en el caso del pájaro, el miedo— y el PAF motor que, en este caso, es la respuesta adecuada: volar.

Ahora bien, en animales con lesiones en la amígdala (Weiskrantz, 1956) o en el telencéfalo, pero cuyos hipotálamos se hallan intactos, es posible activar PAF motores con una clara expresión emocional.

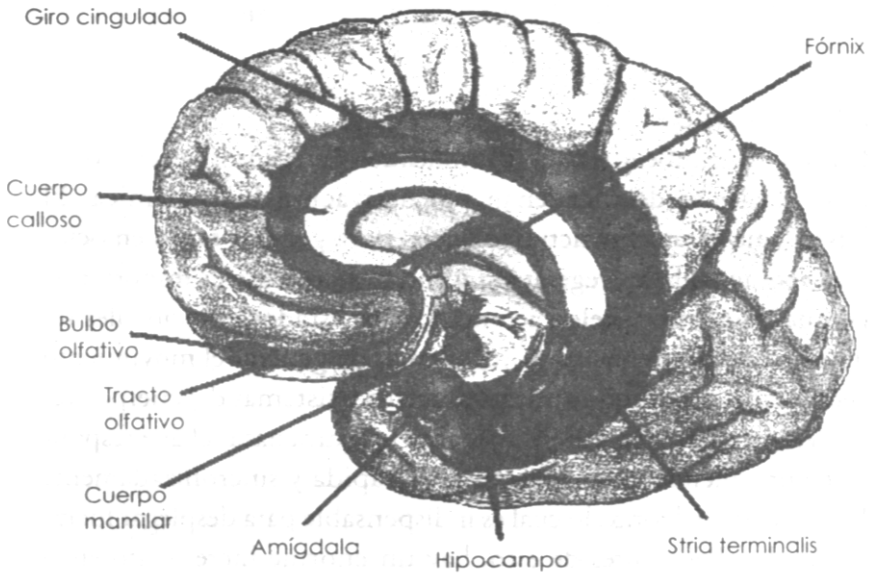


Figura 8.3

Diagrama de las regiones cerebrales que constituyen el sistema límbico, que incluye el bulbo y tracto olfativos, el hipotálamo (el cuerpo mamilar indicado aquí es parte del hipotálamo) y el hipocampo. Ver texto para más detalles. (Tomado de PSYweb.com.)

La estimulación experimental de ciertas áreas del hipotálamo produce una respuesta semejante a la agresión (ver Smith y de Vito. 1984; Schwartz-Giblin y Pfaff, 1985-86) que, si el cerebro entero no se encuentra intacto, se conoce como "agresión simulada". Dicha expresión emocional es sólo la manifestación externa de lo que mentalmente asociamos con algunos estados emocionales internos, pero cuyo contexto no existe en ese momento (algo semejante a lo mostrado en la figura 8.1). El animal puede producir los sonidos y los gestos asociados con lo que reconocemos como miedo, dolor o agresión, tales como sisear y mostrar los dientes, pero se trata de una condición simulada. Estos sonidos y gestos se emiten en ausencia del estado emocional que normalmente sirve de contexto para generar tales manifestaciones.

Los humanos también podemos presentar emociones simuladas, como cuando derramamos "lágrimas de cocodrilo". También los actores aprenden a llorar de esta manera. Una vez más, vemos que tanto las emociones como la contraparte motora a la cual están asociadas son PAF por derecho propio, pero que pueden eliminarse completamente, lo cual indica que, de hecho, son entidades puramente fisiológicas.

La amígdala

De lo anterior se desprende la siguiente pregunta: "¿Dónde se encuentra el sustrato neurológico de las emociones, por oposición a sus manifestaciones externas? En animales, la activación experimental eléctrica o mediante aminoácidos excitatorios en la amígdala (figura 8.3) (Fernández de Molina y Hunsperger, 1959; Velasco et al, 1989) desencadena signos fisiológicos y de comportamiento coherentes con estados emocionales de miedo y/o malestar (ver LeDoux, 1998). La estimulación amigdalar a largo plazo produce enfermedades relacionadas con el estrés, como úlceras gástricas (Morrow et ai, 1993; Ray et al, 1993). Lo mismo se observa en seres humanos cuya actividad en este núcleo sea anormal debido a epilepsia. Es evidente que estas anomalías se acompañan de sensaciones con contenido emocional, el cual, sin embargo, carece del contexto apropiado, como tener mucho miedo cuando no hay nada que temer (Charney y Deutch, 1996).

Igualmente, lesiones en este núcleo producen el conocido síndrome de Klüver-Bucy, en el cual los animales (y los humanos también) se muestran inusualmente plácidos y emocionalmente indiferentes (Klüver y Bucy, 1939; Weiskrantz, 1956; ver las revisiones de Horel et at., 1975; Trimble et al, 1997; Hayman et al, 1998). Una característica de los animales, o seres humanos, con lesiones en la amígdala es que carecen de la vehemencia requerida para iniciar o completar los actos más simples y parecen incapaces de generar los sentimientos emocionales que generalmente acompañan a situaciones amenazantes o incluso dolorosas. Resulta aun más interesante que los individuos con Klüver-Bucy tampoco reconocen el contexto del peligro, pese a tener intacto el resto de la perspectiva sensorial o motora, lo cual, al menos en su manifestación externa, recuerda la condición del Parkinson ya mencionada. Sin embargo, neurológicamente el origen de estos síntomas es muy diferente. El paciente con Parkinson no puede expresar su estado emocional porque perdió los PAF motores asociados a la emoción; el paciente con Klüver-Bucy dispone de los PAF mas no así de la amplificación emocional o contextual necesaria para liberarlos en una expresión emocional. Al respecto, en un artículo clásico, Geschwínd (1965) planteó la cuestión del "síndrome de desconexión". Si se "deaferenta" la entrada amigdalar desde la corteza, no se desencadena la activación ascendente de la amígdala hacia el tálamo, responsable del componente cognitivo, o la activación descendente hacia el hipotálamo, la sustancia gris medial del tallo cerebral o hacia el puente y la medula, responsables de la expresión motora de las emociones (Fernández de Molina y Hunsperger, 1962). Se dio

aceptación al síndrome de desconexión, ya que explicaba experimentos como el de Downer (1961), quien mostró que lesiones en las conexiones entre la corteza visual y la amígdala, si bien no ocasionaban ceguera u otros impedimentos visuales, resultaban en una modalidad específica del síndrome de Klüver-Bucy, o sea, impedían generar emociones a partir de estímulos visuales, pero no a partir de otras entradas sensoriales.

El rinencéfalo

El conjunto de regiones corticales asociado con la amígdala recibe el nombre colectivo de rinencéfalo, ya que parece haber evolucionado a partir del sistema olfativo. El sistema rinencefálico está constituido principalmente por la parte del cerebro que rodea directamente los ganglios basales. Este "círculo" contiene el epitelio olfativo, el bulbo olfativo, la corteza inmediatamente posterior al bulbo olfativo, o corteza prepiriforme, la corteza piriforme en si (cuyo nombre deriva de su forma de pera), así como la corteza entorrinal y el hipocampo, y anterior a éste el cíngulum, ya mencionado. Todas estas áreas parecen relacionarse profundamente con las emociones, así como con la activación o liberación de los PAF que suceden después de haberles asignado contexto a los estados funcionales. La actividad de la corteza cingulada ofrece especial interés, porque lesiones en ella pueden interferir con el dolor y otros componentes emocionales (Rainville et al., 1997). Por su conectividad con la amígdala, el tálamo, los ganglios basales y el hipotálamo, esta parte de la corteza se relaciona íntimamente con las emociones. Tales interconexiones conforman et sustrato neuronal para la adquisición y expresión motora de los estados emocionales (ver Adrianov, 1996;Saper, 1996; Heilmany Gilmore, 1998;Davis, 1998).

Olfato y emoción

De lo anterior, el lector se preguntará qué relación puede haber entre el olfato y la emoción. Comparada con la visión o la audición, la información externa que aporra el sistema olfativo humano es muy limitada. Obviamente podemos reconocer gran cantidad de sustancias olorosas, pero las categorizaciones evocadas son muy globales y simples: ¿Es un olor agradable o desagradable? No es mucho más lo que se puede identificar, a menos que se trate de un conocedor de vinos, de un cocinero excepcional o de un químico de perfumes. Quizás este tipo de experiencia gruesamente dividida y categorizada —si o no— describe claramente lo que fuera la conciencia en animales muy primitivos. Emerge de nuevo la estrategia macroscópica del cerebro de reducir las elecciones: esto huele mal, no se lo coma. Esto huele bien copule con ello (Doty, 1986; Shipley et al., 1996). Este mecanismo es burdo, amplio y vigilante. Al parecer, tiene un rango que es limitado y a la vez extraordinariamente poderoso en su capacidad de identificar olores relacionados con las emociones que generan los PAF motores necesarios para sobrevivir. Pese a su enorme capacidad de discriminación, incluso animales con aparatos olfativos tan exquisitos como los sabuesos no parecen utilizar su olfato sino como indicador para buscar o evitar. Ello puede ser producto del elemento que se mide que, en el caso del olfato, es la química de los objetos; es decir, es una sonda molecular y, como tal, no es mucho lo que puede informar sobre la naturaleza macroscópica del mundo, al contrario del tacto o de la vista.

Aunque "esto huele bien, copule con ello" suena un poco soez, con frecuencia es así como suceden las cosas en la mayoría de las especies. Por interesante que resulte este tipo de atracción, el hecho de relacionar el olfato (figura 8.3) con la emoción plantea un espinoso debate en la actualidad. El problema radica en que la información sensorial puede modificar profundamente la conducta, sin llegar jamás al nivel de la conciencia. Hoy en día, el tópico del sistema vomeronasal (influencia de las feromonas) en los humanos tiene mucha importancia en la discusión sobre la conciencia. Como este sistema olfativo vestigial carece de conectividad central, se cuestiona seriamente que pueda dar lugar a actitudes de placer o desplacer entre las

personas. Además, aparentemente lo haría sin llegar a la conciencia; en otras palabras, la información que impulsaría tales decisiones se originaría en un órgano receptor periférico, sensible a las feromonas y localizado en la parte anterior de la nariz, según lo cual podríamos sentirnos atraídos o repelidos por alguien, sin saber el porqué.

Sería más plausible pensar que otras llegadas "sublimínales" generasen los gustos y disgustos irracionales. No hay duda de que algunos estados o actitudes emocionales de gusto o disgusto se implementan mucho antes de que entre en juego el poder inquisitivo de la conciencia. El conocido poema del siglo XVIII de Thomas Brown acerca de su maestro John Fell, arzobispo de Oxford, resume brevemente lo anterior:

Nos os amo, Doctor Fell, no se por qué.
Motivos sin embargo debe haber,
pues ciertamente hay algo que sí sé:
no os amo doctor Fell, no sé por qué.

Esto plantea un importante problema, pues se relaciona con la posibilidad de que la conducta, con su increíble gama de detalles y expresión, pueda modularse profundamente por eventos fisiológicos que no se experimentan a nivel conciente. Sin embargo, tales eventos ejercen una profunda influencia sobre las metas a largo plazo, implementadas en un momento dado por el sistema tálamo-cortical. Quizás algunos animales operen solo en tal modalidad, es decir, que con una organización adecuada, el sistema no necesitaría de la conciencia para responder desde el punto de vista del comportamiento a los estímulos externos.

Detengámonos brevemente en la hipótesis de que algunas actitudes e intenciones se relacionan con estímulos recibidos subconscientemente. Según esto, habría comportamientos que se activan subconscientemente, pero cuya expresión es lenta. Este sistema carece de la rapidez para afrontar estímulos que exijan acciones más veloces, como responder ante un objeto duro que vuela directamente hacia uno. Los estados emocionales así generados, serían análogos al bienestar experimentado tras una comida, cuando la mayoría de los mecanismos digestivos son dirigidos por el sistema nervioso sin que intervenga la conciencia.

¿Qué nos dice esto acerca de la conciencia? Que en realidad ésta representa la solución para un sistema hipercompleto, muy a la manera de los PAF. Si en el dominio motor los PAF representan módulos de función fugaces pero bien definidos, que se emplean y se olvidan como mejor convenga, la conciencia representa asimismo un módulo de función, pero un módulo de foco, el cual también es transitorio y se utiliza en un contexto momentáneo, descartándose posteriormente. De nuevo, vemos una reducción de las elecciones, sólo que aquí se traca de seleccionar el mejor foco, dado que no es posible enfocar permanentemente todo lo que ocurre dentro y fuera del cuerpo. Los eventos fisiológicos que operan en marcos temporales más prolongados, como las funciones vegetativas, de digestión y de cicatrización de heridas, en su mayoría no llegan a la conciencia porque no necesitan de sus propiedades predictivas y decisorias. La conciencia es discontinua, porque las estrategias globales de enfoque ordenan que así lo sea.

La conciencia y las emociones

Respecto de los PAF y de los estados emocionales asociados con su liberación, nos asomamos a algo muy interesante y bien diferente. Aunque el sistema tálamo-cortical puede activar la cognición y la conciencia, éstas probablemente evolucionaron a partir de los estados emocionales que desencadenan los PAF.

Ya se discutió que las capacidades predictivas del sistema tálamo-cortical son extraordinariamente ricas. Para que el sistema pueda tomar una decisión, una vez que efectúa una predicción, debe poder enfocarse hacia las soluciones más viables, hacia la reducción de elecciones. Lo que haré respecto de alguna predicción define mi estrategia, y la ejecución de la

solución define la táctica o los PAF. La estrategia consiste en reducir elecciones, el acercamiento al ámbito general de aproximación correcta. ¿Le gusta o no? ¿Atacará o se defenderá? En diferentes contextos, es lo que todos hacemos de una manera u otra antes de actuar (efectuar un movimiento). El punto importante aquí es que el sistema debe optar por la estrategia general que implementará. Escoger una estrategia siempre implica eliminar otra; la organización del sistema exige darles prioridad a los estados emocionales momentáneos, escoger el más importante y entonces actuar sobre él.

Consideremos el siguiente ejemplo: dos personas pelean y están a punto de matarse, pero inesperadamente surge algo tan gracioso que no pueden impedir reír a carcajadas. En un instante, esto desvanece toda la implementación estratégica que hubiera conducido a la guerra; ahora el operativo estratégico cambió por completo: ¡a reír! ¿Se rascará el perro la picazón o comerá el alimento?

La una o la otra, pero nunca ambas. Dada la complejidad de las decisiones y la rapidez con la cual el sistema nervioso debe implementar las estrategias globales, la única solución adecuada para lo anterior es aquélla en la cual el animal esté consciente de un estado emocional particular. ¿Por qué? Porque la conciencia tiene la gran capacidad de enfocar —razón por la cual es necesaria— y porque es la base de nuestra habilidad de escoger.

Si las posibles elecciones se reducen al conjunto útil de aquéllas que resulten más provechosas en una situación particular, se cumple con el prerrequisito para que un comportamiento sea efectivo. Sería contraproducente reducir las alternativas con base en una sola solución, independientemente de su viabilidad potencial y sólo en aras de ahorrar tiempo, y por esto la selección natural descartó tal estrategia. Otro ejemplo: ¿qué sucedería si el panel de control de un moderno jet de combate, en vez de los complejos instrumentos, tuviera una cara cuya expresión continuamente le indicara al piloto el estado de las cosas? En pleno fragor de la batalla, el piloto no puede estar mirando y evaluando cada instrumento. La cara que le sonríe y quiere decir: "¡Haga lo que tiene que hacer! ¡No se preocupe por las condiciones del avión que todo esta bien!". En este caso, el piloto necesita un aparato que dirija su foco y escoja — ¡y esto es la conciencia! La cara transforma toda la información de entrada en un solo evento coherente. Como es más fácil operar con base en un solo evento, este mecanismo resulta mucho más poderoso que el que evalúa continuamente conjuntos de variables en permanente cambio con control también en permanente cambio. Por esto no hay sino un solo sistema de predicción y, por ende, la conciencia. Un sistema con sólo uno o dos posibles estados no requeriría de conciencia. Los sistemas hipercompletos se tornan pues absolutamente cruciales y son la parte medular de la velocidad de ejecución tanto desde el punto de vista perceptual como motor.

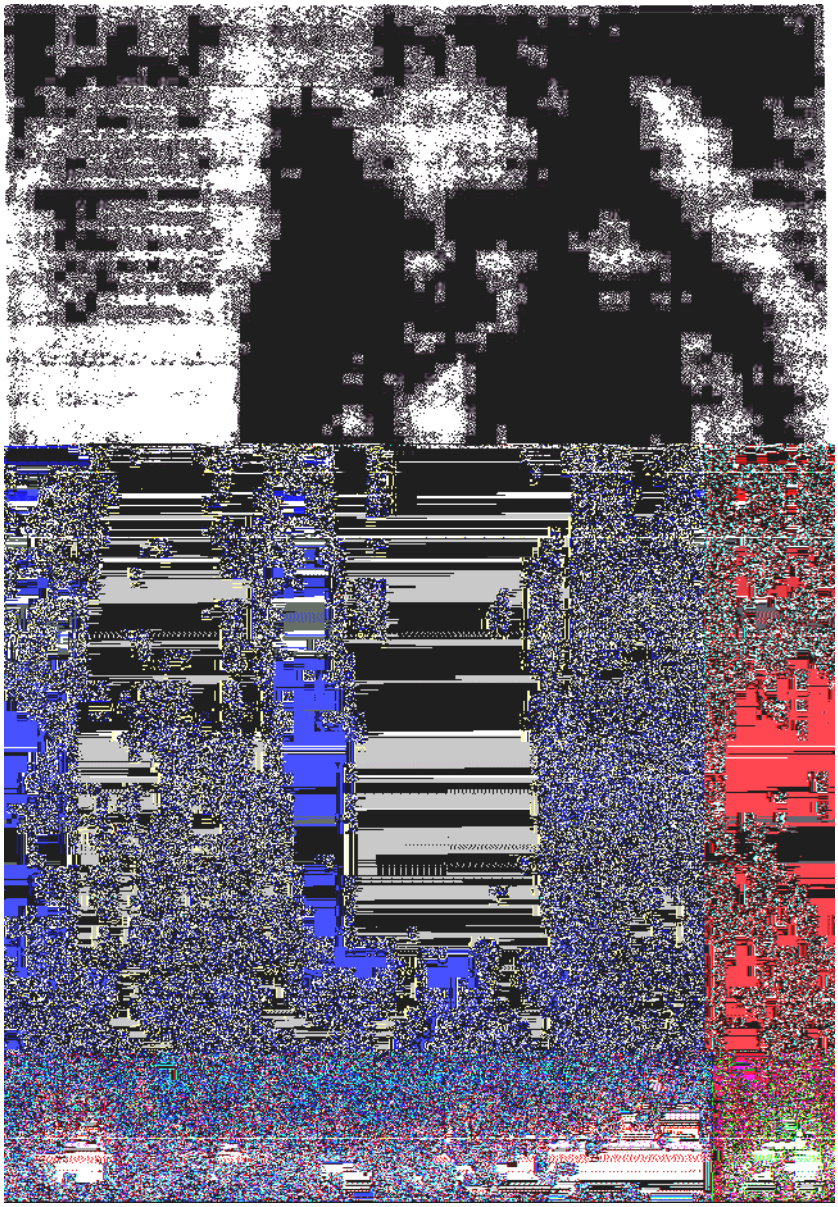
Nuestro sistema evolucionó para aceptar información externa y contextualizarla en lo que sucede internamente (capitulo 3).

Pero, ¿cómo combinar los PAF, las emociones y la conciencia en una sola orden? Ya dije que el sistema tálamo-cortical, especialmente el sistema intralaminar inespecífico, proyecta muy densamente a los ganglios basales, por lo cual, como cabría esperar, no hay percepción que no se acompañe de una posible implementación motora.

En el capítulo 7, cuando hablé de Jascha Heifetz, me referí al complejo repertorio necesario para mover los dedos al tocar el violín con tan alto grado de virtuosismo (o para tocar el violín, sin. más). Aunque intuitivamente parezca imposible que algo tan complicado y de una finura tan exigente como los movimientos para interpretar el Concierto para violín de Tchaicovsky fuera un PAF, de hecho es un módulo automático de función motora discreta. Considerémoslo como sigue: por convención, cuando un solista como Heifetz toca acompañado de una orquesta, interpreta el concierto de memoria, de donde se deduce que el patrón motor altamente específico debe hallarse almacenado en algún lugar, para liberarse cuando el telón se levanta. Lo anterior también habla del intenso estado emocional en el cual debe hallarse el solista para poder enfocarse, para expresar un PAF tan complejo y tan encantador. Este ejemplo ilustra claramente que un PAF puede aprenderse. Más aún, un PAF humano puede ser modificado por la experiencia (Graybiel, 1995).

Prosigamos con esta línea de pensamiento. Existen y existirán otros grandes violinistas, pero Jascha Heifetz era un talento único. ¿Es posible hablar científicamente de estos talentos? ¿Puede abordarse la cuestión de la creatividad humana en términos biológicos? Sí, creo que sí. Pero, aunque discurramos muy razonablemente acerca de la creatividad del cerebro humano, los procesos neurales inherentes a aquello que llamamos creatividad no tienen nada que ver con la racionalidad. Vemos pues que la generación de la creatividad en el cerebro es un proceso que no tiene nada de racional. La creatividad no nace de la razón.

Volvamos a las "cintas motoras" de los ganglios basales. Sugiero que estos núcleos no siempre esperan a que el sistema tálamo-cortical, el "sí mismo", haga uso de ellas (ver, por ejemplo, Persinger y Makarec, 1992). De hecho, la actividad de los ganglios basales es permanente, ejecutando patrones motores completos o fragmentados, y por la extraña conectividad autoinhibitoria entre ellos mismos, parecen actuar como un generador continuo y aleatorio de patrones motores. Aquí y allá escapará al contexto tálamo-cortical un patrón o un fragmento de patrón, sin la aparente contraparte emocional, y súbitamente el lector oirá en su interior una canción o sin motivo alguno tendrá ganas de jugar tenis. A veces las cosas simplemente nos llegan- Para algunos, las cosas que les llegan son realmente únicas; Mozart decía que la música le llegaba ininterrumpidamente.



Arte medieval, Gui de Pavie. “Liber notiablium Phillipi Septimi, francorum regis, a libris Galieni extractus". Médecin découpant la boite cronnienne d'un malade, Italia, 1345. Miniatura. ChantilIy. Museo Conde- Lauros-Giraudon.

9
DEL APRENDIZAJE Y LA MEMORIA

La necesidad de la biología de aprender y de recordar

Aunque los parrones de acción fijos (PAF) constituyen un conjunto extremadamente útil de herramientas desarrolladas por el sistema nervioso, por su misma naturaleza tienen capacidades muy limitadas, es decir, existen fronteras para ellos. Dado que el mundo en el cual se mueven los organismos con movimiento propio cambia continuamente, tanto el rango de los PAF como sus circuitos deben ser modificables. Si el "cableado" funcional de los PAF fuera tan rígido como el del reflejo de rascarse del capítulo 7, simplemente no se hubieran dado maravillas como el lenguaje, tan dúctil para adaptarse a la complejidad de la comunicación humana y del pensamiento. Para sobrevivir, los patrones motores automáticos, que constituyen en realidad los PAF deben recordar y adaptarse a estos cambios. En el ámbito individual, esto se hace interiorizando los cambios del cuerpo y de sus partes a medida que el individuo crece; el sistema nervioso se modifica para acoplarse a este cambio (ver Edelman, 1993; Singer- 1995). Filogenéticamente, esta flexibilidad acarrea una serie de cambios generales en la adaptación, que a la larga deberán interiorizarse, aunque, claro está, no en el sentido lamarckiano de heredar las memorias motoras específicas de nuestros padres.

Ontogénicamente hablando, el acróbata de cuerda floja aprende a modificar los PAF relacionados con el equilibrio y con los renejos de la compensación postural. En realidad, el PAF de la marcha generado por la medula espinal, es decir, el alternar el pie derecho y el izquierdo, es idéntico tanto si se camina sobre una línea recta en la acera o en la cuerda floja: el ciclo debe realizarse en línea recta, aunque la retroalimentación sensorial sea totalmente diferente en ambas situaciones. Al andar en la cuerda floja, la compensación del equilibrio debe ser muchísimo mayor, porque el área donde se coloca el pie es muy limitada, y porque la cuerda se mueve con el cuerpo, mientras que la Imea en la acera es fija. Sin embargo, la principal diferencia es contextual y de gran significado. En el caso de la cuerda floja, una caída puede significar la muerte. En tales circunstancias, la clave es "mucho cuidado" y la idea es que la cuerda se mueva lo menos posible. Éste es un ejemplo de modificación en línea (recordemos que los PAF sólo pueden modificarse si se han activado) de un PAF que cuenta con fuerte "cableado" (por ser muy antiguos, todos los reflejos de equilibrio tienen un "cableado" de esta naturaleza). Esto se asemeja bastante a la modificación utilizada para salvar el jarrón etrusco de la madre, excepto que, en el caso de la cuerda floja, un movimiento en falso puede ser fatal.

Repetición

En este capítulo discutiremos otra diferencia en la modificación de los dos PAF anteriores, que subraya un importante aspecto del aprendizaje y de la memoria: la repetición. Los reflejos de equilibrio, siempre restringidos, se perfeccionan con la práctica. En el caso de los acróbatas de cuerda floja, al igual que en el caso del violinista con su increíble destreza de dedos, tal perfección se adquiere lentamente con años de práctica y repetición. Se trata de intentos de modificación que, pese a ser en línea, con muchas repeticiones se suman en el tiempo. Más adelante veremos que los mecanismos neuronales que reciben patrones de actividad muy repetidos modifican el significado que tal actividad adquiere en el contexto interno. Si un patrón de actividad significa "sombra", lo que generalmente quiere decir "predador", lo que a su vez significa "corra", entonces las propiedades intrínsecas de las neuronas acortarán este circuito, para resaltar y agilizar el complejo significado de tales asociaciones: de ahora en adelante, las sombras liberarán inmediatamente el PAT de "correr". Hay otras maneras de entender el cambio de significado interno. Al ver a alguien por primera vez, su cara se representa en mi cerebro en un patrón particular de actividad de ciertas neuronas específicas. Si con el tiempo este individuo

se convierte en un amigo íntimo, el significado interno del patrón de actividad que representa esta persona será bien diferente del que tuvo en el primer encuentro, pese a que el patrón de actividad de su cara sea prácticamente igual.

La repetición y la práctica no son las únicas maneras que tiene el sistema nervioso de modificarse. Las propiedades funcionales del cuerpo, de hecho las propiedades de eventos del mundo externo, pueden incorporarse como simple ensayo. Es fácil adivinar que este aprendizaje depende enteramente del contexto interno prevalente en el momento, del estatus emocional particular. Se trata de un aspecto importantísimo del aprendizaje que discutiremos en mayor profundidad en este capítulo.

Obviamente, los PAF de aprendizaje, memoria y adaptación también se observan en la filogenia. Por ejemplo, a través de los milenios, algunas especies modificaron el PAF de nadar en PAF de reptar. En muchas otras especies, los PAF de respirar y de deglutir se modificaron lentamente para que trabajando unidos produjeran ese PAF tan importante conocido como vocalización. En general, al reflexionar sobre los conceptos de aprendizaje y memoria, lo más usual será pensar en las maravillas de la capacidad humana. Cuando se considera la memoria humana, generalmente se invoca el vastísimo acervo de conocimientos que se puede acumular tras años de educación, o la capacidad de evocar, muchas décadas después, eventos singulares de la niñez, de manera tan vivida como la primera vez. Recordemos, sin embargo, que, como todo lo fisiológico, los mecanismos neuronales que sirven de base a estas fantásticas capacidades nos llegaron a través del largo proceso evolutivo de ensayo y error. Para nuestros sistemas nerviosos, es decir, para nosotros, ser capaces de aprender y recordar significa que la evolución no sólo hubo de aprender y recordar, sino también hubo de aprender y recordar la manera como se aprende y recuerda. Nuestro aprendizaje surge, aunque sin planear, a causa de la selección natural. El contenido de lo que aprendemos, sin embargo, es producto de innumerables necesidades y eventos experimentados durante nuestro desarrollo, un resplandeciente sueño llamado "nuestras vidas personales", que se desvanece sin dejar ningún legado biológico inmediato. Nuestros recuerdos mueren con nosotros.

Conclusiones a partir de los milenios: el ser y el devenir biológicos

El aprendizaje y la memoria son temas cruciales para la neurociencia contemporánea, pues la capacidad de aprender es crítica para mejorarnos personalmente en el mundo práctico en el cual vivimos. Aunque ésta sea una verdad discutible, para algunos neurocientíficos la memoria es en sí misma la base del funcionamiento del sistema nervioso. La perspectiva de tabula rasa propone que, aunque el cerebro se halla totalmente "cableado" desde el nacimiento, y pleno de potencial de aprender, de hecho no ha aprendido nada todavía y tiene todo por aprender, hazaña que probablemente ocurre en el resplandor de aquellos lejanos días de la infancia-Por ejemplo, esta posición afirma que el habla se desarrolla Fundamentalmente por refuerzo y retroalimentación (Skinner, 1986).

Así, el cerebro seria una "máquina de aprender", la cual, desde de su origen en blanco, simplemente adquiere y acumula experiencia, a la manera de archivos de memoria apilados unos encima de otros. Esta perspectiva es opuesta a otra, que pienso refleja de manera más precisa y prudente la función cerebral, pues reconoce la capacidad del sistema nervioso de modificarse a sí mismo con base en la experiencia. Además reconoce que básicamente aprendemos cosas que ya sabíamos (ver, por ejemplo, Hadders-Algra et al, 1997, acerca del desarrollo del control postural en niños, y Jusczyk y Bertoncini, 1988; Locke, 1990; Wexler, 1990, acerca del desarrollo del lenguaje).

En otras palabras, nacemos con un bien "cableado" cerebro y con una cantidad increíble de conocimientos adquiridos genéticamente. Lo anterior se ilustra claramente en profesiones como la neurología y la psiquiatría que, de hecho, esperan que todos los pacientes con cierra lesión cerebral manifiesten síntomas semejantes. En otras palabras, el aprendizaje nunca produce alteraciones básicas de la neurología, al punto que ésta sea diferente entre individuos con

diferentes niveles de educación.

Memoria fílogenética: "conectividad básica"

La tarea de la evolución consistió en aprender y sintonizar lentamente las formas apropiadas, las morfologías estructurales, que amplificaron la capacidad de supervivencia de las especies. Al hacerlo, la evolución unió el mundo externo del cuerpo con el del cerebro, lo que resultó en cosas como la oposición del pulgar, la cola del ratón, la nariz del león e incluso la forma del mismo cerebro. Este sería un tipo filogenético de memoria; la forma estructural que se da desde el nacimiento y que no es necesario aprenderla a lo largo del desarrollo, durante el corto período que constituye la vida de un organismo. Tal memoria estructural determina la forma de la especie, el animal total y las arquitecturas de los órganos que se reflejan como un eco a través de los milenios (figura 9-1).

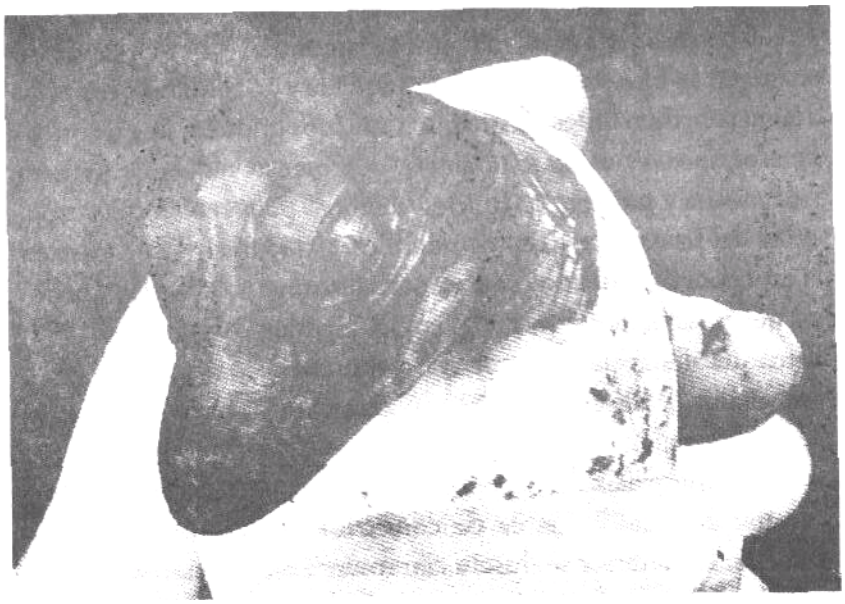


Figura 9.1.
Fotografía de la eclosión de un caimán cuyas capacidades al nacer son ya muy semejantes a las del progenitor adulto.

Pero la memoria filogenética de la estructura expresada al nacer no basta. Por cautivadores que resulten los movimientos de los OJOS del recién nacido, si estos ojos no funcionan, entonces no es claro cuál sería el propósito de la memoria filogenética de la forma. Debe existir otro tipo de memoria residente desde el nacimiento, aquélla que únicamente enlaza la forma con la función. Una célula muscular no es nada si no puede contraerse (a menos que se trate de un pez eléctrico, en si que algunos músculos se modificaron para convertirse en órganos generadores de electricidad) (Bennett y Pappas, 1983). Una neurona, con sus magníficas e intrincadas ramificaciones dendríticas y axonales, no es nada si no se comunica con otras neuronas, músculos o glándulas (a no ser que se trate de otro tipo de pez eléctrico, cuyos terminales nervio-sos se convierten en un órgano particular generador de electricidad (Bennet et al., 1989).

La memoria dinámica: "circuitos en acción"

Dentro de la arquitectura orgánica (la planta física), vemos entretejerse un segundo tipo de memoria tan antiguo filogenéticamente como el que confiere la forma, consistente en las estructuras dinámicas electroquímicas (la actividad cerebral intrínseca, previa a la experiencia)

que ocurre en nuestros cerebros y nos define a "nosotros". La conectividad neuronal y la "música" electroquímica que .la soporta conforman la memoria evolutiva que permite la presencia de oscilaciones intrínsecas de las células excitables, las cuales representan la realidad externa, aunque en una geometría diferente. Estas propiedades hacen posible el acople preciso de la impedancia, que soporta la comunicación neuronal electroquímica. Tal "pegamento funcional" es la base mediante la cual se conjugan los conjuntos específicos funcionales, presentes desde el nacimiento y que permanecen a través de generaciones.

El conjunto de estos dos tipos de memoria origina los apriori estructurales del cuerpo y del cerebro, como es el tener piernas que se muevan y neuronas que durante el desarrollo se entretejan en módulos específicos funcionales, conocidos como lóbulos, haces de fibras y núcleos. Independientemente de lo que hagamos en el curso de nuestras vidas, no podemos olvidar los circuitos enormemente intrincados del lóbulo occipital o de la corteza visual, el área central del procesamiento visual, a menos que los ojos nos fallen totalmente desde muy niños. Podemos aprender la palabra que denota "verde", pero la percepción del verde no se aprende ontogenéticamente; se ha aprendido y recordado filogenéticamente. Esta percepción tiene un sustrato físico y, excepto por alguna lesión en el SNC, es una capacidad que no podemos ni aprender ni olvidar — esto se sale de nuestras capacidades biológicas.

Por tanto, la memoria estructural y la eléctrica funcionan en tándem y, desde su nacimiento, Otorgan al cuerpo y al cerebro un hernioso estado biológico, de "ser" y de "devenir" — ser, en el sentido de estructuras funcionales, manos, bocas, PAF y cosas por el estilo, presentes desde el nacimiento, y devenir, en el sentido de que todo el sistema debe adaptarse a los cambios impuestos por el crecimiento y el desarrollo, o por el deterioro de la edad. El sistema nervioso debe inervar y adaptarse a cualquier tipo de cuerpo, pues mientras este último crece, el cerebro no conoce la estatura final, o que tan apartados tendrá los ojos: el sistema nervioso debe adaptarse funcionalmente a un cuerpo que nunca "ha visto". Sin embargo, en todos los estadios del desarrollo, el sistema nervioso se adapta para que cada módulo funcione normalmente en una escala proporcional al tamaño del cuerpo y a sus respectivas proporciones. Mis pies están creciendo, pero mis piernas crecen más rápido. ¿Que tiene qué ver esto con la encienda del PAF de la marcha? ¡No mucho!

La geometría funcional del sistema nervioso, discutida en el capítulo 3, debe adaptarse continuamente a la geometría funcional de un cuerpo desconocido, puesto que ésta cambia durante el desarrollo. Tal adaptación necesariamente depende de la actividad; durante toda la ontogenia, el diálogo entre las neuronas y los músculos (u órganos) blanco siempre se impulsa activamente, y el proceso de interiorización se relaciona íntimamente con la repetición de los patrones de actividad ya mencionados.

El "precableado" de la función cerebral

Comparemos esta memoria filogenética con la perspectiva de tabula rasa, según la cual el sistema nervioso aprende a aprender durante el desarrollo después del nacimiento y del cual se desprende que, por lo tanto, no es posible ningún aprendizaje antes de nacer. Echemos una mirada al conocido videoclip sobre la vida silvestre, en el cual una manada de animales salvajes bebe pacíficamente en la ardiente sabana africana. Vemos una hembra momentos antes del parto. La cámara se mueve hacia la periferia, en donde tres o cuatro leones se aproximan a la manada, claramente en plan de caza. La hembra en pleno parto queda inmóvil y un león, todavía muy distante, la ve. Cinco segundos después del nacimiento, el león ataca. La madre protege a la cría, haciéndole frente a la primera arremetida. La cría aterrada, tambaleándose en sus piernas húmedas y larguiruchas, se aleja del león logrando evadir frenéticamente al atacante, aunque no por mucho tiempo. El león la alcanza y de una sola arremetida la agarra por la garganta; en unos segundos la corta vida del pequeño termina.

Este breve videoclip sobre las brutales realidades de la vida salvaje pone el énfasis en algunos puntos específicos y prominentes. En primer lugar, vemos que desde el nacimiento el

PAP de correr (marcha y cadencia) se manifiesta explícitamente, viene "precableado" y es funcional. La perspectiva de tabula rasa sostendría que estos cinco segundos entre el nacimiento y la carrera bastan para que la ontogenia enseñe a correr al recién nacido, lo cual no convence ni intuitiva ni fisiológicamente. Incluso una sola sinapsis funcional tendría dificultades para estabilizarse tan rápidamente. En segundo lugar, la perspectiva de tabula rasa propone que el aprendizaje sólo ocurre con la experiencia sensorial. En tal caso, el recién nacido tendría que haber aprendido a correr por ensayo y error. Pero corrió, ciertamente no tan bien como un adulto, y lo hizo la primera vez que lo necesitó. El ensayo y error para aprender a correr tiene que haber ocurrido durante la filogenia. Es evidente que, junio con la habilidad de modificar el PAF subyacente cuando se ha activado (la capacidad de saltar en una y otra dirección), codo ello ya había sido instalado como un módulo funcional desde el nacimiento. Correr es sencillamente una actividad tan crítica para la supervivencia que no es posible aprender e incorporar su funcionalidad de novo durante la ontogenia, generación tras generación. La filogenia ha organizado este PAF, de la misma manera como la cría comienza a respirar regularmente desde el nacimiento.

En la película hay un segundo aspecto del aprendizaje y de la memoria, que hace resaltar otra importante diferencia respecto de la propuesta de la tabula rasa. Según lo expuesto en el capítulo 8, los PAF motores sólo se generan a partir de los estados emocionales apropiados (aunque no siempre tan "apropiados", como en el síndrome de Tourette). En el caso de la cría, el estado emocional es de miedo y, por tanto, es éste el que libera el PAF de correr, lo que indica que, además de los PAF, ciertos estados emocionales también vienen preinstalados y operan desde el nacimiento. A los cinco segundos de nacida, esta cría fue capaz de asimilar el contenido específico de su mundo externo (un león se acerca). Lo dimensiona contextualmente (león significa peligro), implementa un estado emocional apropiado (peligro significa miedo) y posteriormente actúa sobre este contexto interno la imagen sensomotora de miedo que significa ¡"Corra"! Pero no sólo significa "correr" sino esquivar al atacante, es decir, cambiar abruptamente la dirección de la fuga. Esta secuencia indica que la matriz (o espacio funcional interno) vista en el capitulo 3, que relaciona "tensorialmente" el contenido del mundo externo con el contexto interno, viene "precableada" y lista para hacer lo que hace desde el nacimiento. Esto también significa que la capacidad de tener conciencia es un a priori filogenético, funcional.

Un tercer tipo de memoria: "aprendizaje a partir de la experiencia", práctica, práctica y más práctica

¿Qué puede decirse entonces de la memoria y del aprendizaje? Introduzcamos formalmente un tercer tipo de memoria del cual ya se ha hablado indirectamente: la "memoria referencial", que es lo que nos viene a la mente con el término "memoria". Pero aclaremos: este tercer tipo se basa en los Otros dos (es decir, en la arquitectura corporal y en el "alambrado" básico funcional del cerebro), y opera mediante la modificación sutil de las propiedades estructurales y dinámicas de la conectividad cerebral. A la vez, es fundamentalmente diferente de los otros dos, e interioriza el mundo externo y sus propiedades. Es la capacidad funcional del cerebro la que permite recordar el mundo particular de cada individuo, por aposición a "todos los mundos posibles" precableados para el nacimiento. En otras palabras, este tercer tipo de memoria es posible gracias a la conjunción de los dos primeros, ya que permite tanto la interiorización de las propiedades de nuestro cuerpo en la red neuronal (espacio funcional interno) del cerebro, como las consiguientes proyecciones que de esta referencia interna se deriven hacia el mundo externo. Ciertamente, esta clase de memoria permite interiorizar las propiedades del mundo externo en la matriz funcional interna, generada por los dos primeros tipos de memoria (figura. 9.2).

Si bien los dos primeros tipos representan la memoria acumulada y decantada durante muchas vidas como características biológicas, fruto de la selección natural, la memoria referencial representa el cúmulo de aprendizaje realizado durante el desarrollo y el lapso de una

vida particular. Es una capacidad intrínseca que facilita las propiedades predictivas del cerebro, por lo cual constituye un aporte fundamental a la supervivencia del organismo. Espías diversas estructuras deben resonar para que determinada imagen sensomotora pueda predecir y sea útil: "Si busca una llave en su llavero, vaya a la luz". Se trata de tener en cuenta contenidos significativos del mundo externo en el contexto interno momentáneo, generado por el sistema tálamo-cortical. Además, si las demandas del contexto interno prevalente así lo requieren, también se trata de posibilitar a la memoria el uso de estas estructuras funcionales significativas. Si algo se inscribe en la memoria, posteriormente se habrá de recuperar o de recordar. "Los leones normalmente van allí, de modo que recordaré no ir, a menos que sea absolutamente necesario". Así, toda la ecología social, o digamos el abrevadero social, se basa en que sus participantes dispongan de tales memorias, con tiempos de acceso y un orden social bien definido.

Así pues, este tercer tipo de memoria referencial interioriza dentro de la matriz funcional generada por las otras dos las propiedades del mundo particular en el que cierto organismo sobrevive, porque, como se vio en el capítulo 3, el sistema fabrica polos de atracción basados en la repetición. Si el sistema ya "ha visto" algo antes (cierto patrón de actividad eléctrica), lo reconocerá mejor cuantas más veces lo vea y también coactivará patrones familiares asociados que ya fueron integrados. Además, el patrón de disparo neuronal en determinada área de la corteza sensorial a la larga se asocia y resuena con neuronas de áreas corticales cuyas funciones se relacionan entre sí (por ejemplo, áreas visuales tálamo-corticales con áreas tálamo-corticales de reconocimiento de caras). De este modo, un patrón de estructuras llega a adquirir significado, como cuando reconozco la cara de mi nieto. La repetición y la simultaneidad hacen que este conglomerado de patrones dinámicos se asocie con ciertas actividades en las áreas de generación del lenguaje, y pronto será inevitable asociar la cara del nieto con el "sonido" interior de su nombre. De manera muy semejante, si un fragmento de canción se libera al azar de los ganglios basales, este fragmento de PAF posteriormente evocará también la visión interna de la última vez que se la oyó, o tal vez del sitio en donde se hallaba la persona y lo que hacía al oírla por primera vez.

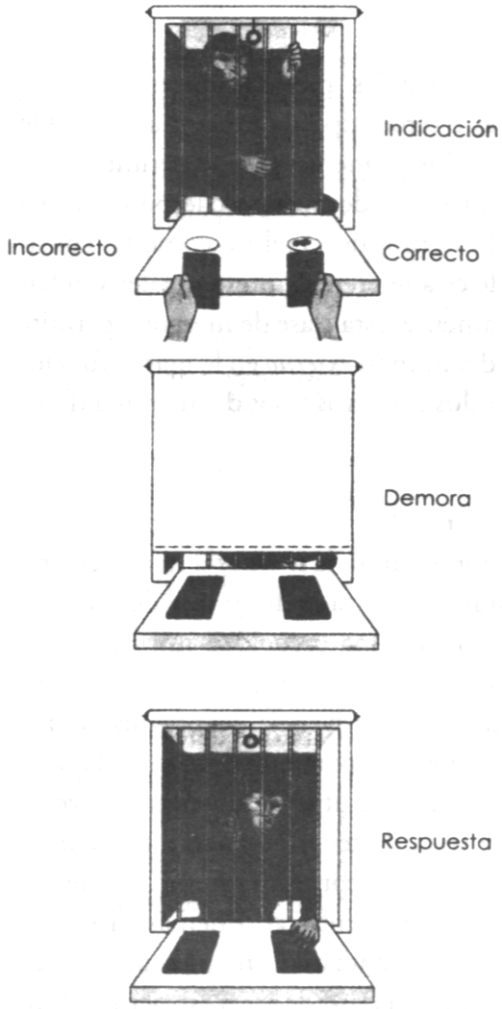


Figura 9.2

Memoria de trabajo. Una tarea de respuesta diferido pone a prueba la función de lo corteza prefrontal en la memoria de trabajo. El mono observa brevemente el estimulo blanco que en este caso, es un pedazo de comida. Tras un intervalo se le permite al animal alcanzar la comida. En diversos ensayos el experimentador cambia aleatoriamente la ubicación de la comida, por lo que coda respuesta sólo pone a prueba la retención visual o espacial a corto plazo. La información pertinente no está a la vista en el momento de generar lo respuesta y por esta razón el comportamiento debe guiarse por la representación interno de la ubicación del refuerzo. (Tomado de Goldman-Kakic 1992. p. 112.)

Este tercer tipo de memoria puede ilustrarse muy fácilmente.

Un amigo a quien hacía tiempo no veía vino a quedarse en casa por algunos días. Tras su partida, lo que mejor recordaba era la imagen de su cara y algunas conversaciones con él. Parece obvio que este tipo de recuerdo sea más vivido inmediatamente después de una conversación, pues es una forma de memoria de trabajo (ver más adelante, Goldman-Rakic, 1987) o memoria de eventos en curso, igual a la que se emplea para recordar dónde se dejó el libro recién comprado. Este recuerdo puede desvanecerse en pocos oías, pero no deja de sorprender el sentimiento apremiante de intentar recordar dónde está el libro. Por otro lado, si mi amigo accidentalmente incendió la casa, recordaré su visita por el resto de mi vida. Este fenómeno se conoce como una ocasión memorable, es ente referencial y se transfiere a la memoria a largo plazo en el formato de "cosas que nunca se olvidan". ASÍ, la memoria referencial puede ser de corto plazo (que se mantiene durante breve tiempo; "¿Dónde dejé el automóvil en este estacionamiento?"), por oposición a la memoria a largo plazo del amigo que incendió mi casa.

Memoria implícita y explícita

La memoria referencial a largo plazo puede también subdividirse en memoria implícita y explícita (Milner et al., 1998), Todo el que haya intentado aprender a tocar un instrumento musical sabe que "la práctica hace al maestro". La vieja anécdota del turista que le pregunta a un habitante de Nueva York cómo llegar al Carnegie Hall, a lo cual contesta: "Con mucha práctica". En el caso de artistas como Jascha Heifetz, vemos que en el curso de una sola vida la perfección se inclina ampliamente hacia el aspecto ambiental de la ecuación naturaleza/ambiente, aunque también depende del talento natural del individuo. Algo que muchos han aprendido con sudor y lágrimas.

La memoria explícita, también conocida como memoria declarativa o consciente, generalmente se refiere a la memoria que es la base del recuerdo consciente de las cosas, como caras, nombres de objetos o experiencias pasadas. A su vez, se subdivide en dos aspectos diferentes según el proceso de recuperación (Schacter, 1987): la recuperación voluntaria, intencional de un recuerdo, y la conciencia subjetiva consciente de haberlo recordado (Tulving, 1983). La memoria implícita, no declarativa o inconsciente, es la recuperación no consciente, no intencional de rutinas para efectuar una actividad aprendida o una habilidad. Es posible efectuar algo sin conciencia de haberlo aprendido (para revisiones recientes acerca de la memoria explícita e implícita ver, por ejemplo, Estévez-González et al-, 1997;Verfaellie y Keane, 1997; Milner et al., 1998; Schacter y Buckner, 1998; Schacter et al-, 1998;Wagner y Gabrieli, .1998; ver también Rovee-Collier et al., 1997, para estudios de memoria en recién nacidos, que son un interesante reto a las limitaciones de definir la memoria explícita como si fuera exclusividad del recuerdo "consciente").

El que Jascha Heifetz supiera cómo pasar el arco sobre las cuerdas para producir un exquisito tono, ejemplifica esta memoria implícita. Se trata de un aprendizaje motor altamente refinado, en el cual la memoria del aprendizaje se aplica con cada golpe del arco, pero del cual el artista no tiene un recuerdo consciente en ese momento.

Que estos dos tipos de memoria no se hallan en el mismo sitio y además son disociables entre sí, no es sólo un problema de semántica, sino que resultó de estudios comenzados en los años 50 con pacientes amnésicos sometidos a lobectomías temporales mediales, efectuadas como paliativo de epilepsias intratables. Tales pacientes perdieron la capacidad de recordar nuevos lugares, nombres, eventos o personas. Aunque podían mantener el recuerdo de una imagen durante corto tiempo, en cuanto su atención se distraía, la imagen se perdía irremediablemente, hasta el punto de que, al volver a experimentarla, se convertía en algo novedoso y no familiar. El más famoso de estos pacientes fue "HM", quien fuera estudiado extensamente durante muchos años (Scoville, 1954;

Scoville y MiIner, 1957; Penfield y Milner, 1958).

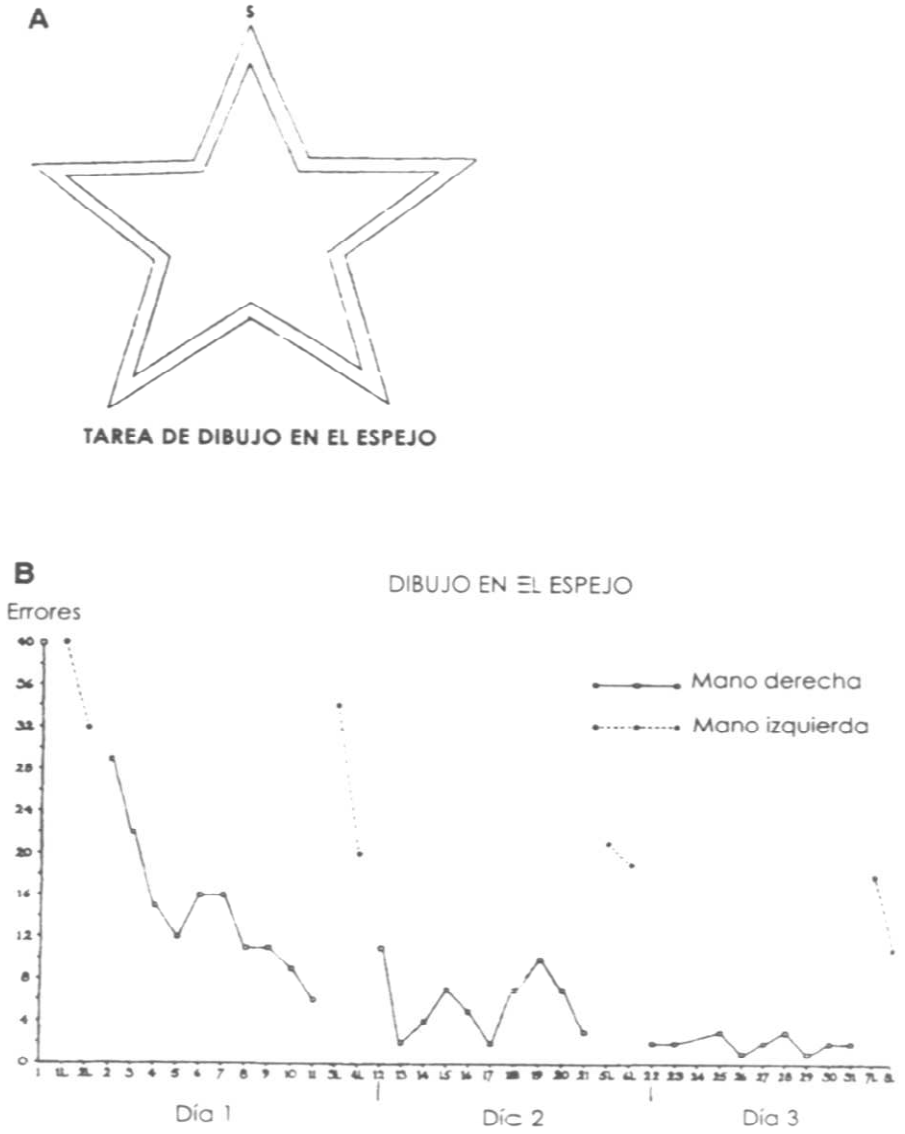


Figura 9.3

(A) Incremento en el aprendizaje de una rutina de procedimiento en la que el paciente HM aprendió a trazar una línea entre los dos contornos de una estrella, comenzando en el punto S y mirando en el espejo su mano y la estrella. El dibujo mejoró progresivamente en los tres días de pruebas, a pesar de su incapacidad de recordar el haber realizado la prueba previamente. La gráfica de (B) muestra el número de veces en cada ensayo en que HM se salió de los límites al dibujar la estrella. (Tomado de Milner et al. 1998, figura 2, p. 449: según Milner, 1962.

Para los investigadores de la época resultó sorprendente que, en general, los pacientes pudieran aprender y retener correctamente habilidades motoras, y que tuvieran curvas normales de aprendizaje. Sin embargo no guardaban recuerdo consciente de haber efectuado la tarea antes (Milner, 1962) (ver figura 9.2). Así, el paciente cuya memoria explícita para la información adquirida recientemente se había obliterado conservaba intacta su capacidad de aprendizaje motor. Éste fue el primer tipo de memoria implícita cuyos sustratos neurales se diferenciaron claramente de los del “recuerdo". El paciente HM pudo retener una rutina de dibujo relativamente difícil (figura 9-3) en 30 ensayos durante tres días, pero al enfrentarse con la tarea después de los tres días de aprendizaje no tenía la menor idea de haberla realizado antes. No le era "familiar".

Otra forma incluso más curiosa y sorprendente de memoria implícita sale a la luz en

pacientes amnésicos a quienes que se les pide identificar esbozos de dibujos de objetos comunes, difíciles de identificar, pues se les han borrado muchas partes del contorno. Con sucesivas presentaciones, los pacientes gradualmente mejoran su percepción y capacidad de identificar el dibujo, y lo recuerdan después de muchas semanas de pruebas. Sin embargo, al presentarles estas tareas de nuevo, no recuerdan haberlas efectuado jamás. Este "aprendizaje perceptual", como lo llamara Brenda Milner, es lo que hoy en día conocemos como recuerdo por aprestamiento (Milner et al; 1968; Warrington y Weiskrantz, 1968; ver Milner et al, 1998).

Otros tipos de memoria implícita incluyen aprendizajes emocionales como el condicionamiento por miedo (LeDoux, 1996, 1998; Davis et al., 1996) y el aprendizaje de categorías, y la capacidad de aprender a identificar y clasificar objetos según sus características o propiedades deducidas (Weískrantz, 1990; Tulving y Schacter, 1990; Redd et al, 1999). A partir de estudios de lesiones en animales o de pacientes amnésicos y con la tecnología moderna de neuroimágenes como el TEP (tomografía por emisión de positrones) y las IRMF (imágenes de resonancia magnética funcional), ya se han localizado las regiones cerebrales más vinculadas a estos tipos de memoria (para una revisión, ver Schacter y Buckner, 1998). Las regiones subyacentes a la memoria implícita incluyen principalmente la amígdala, mientras que algunos aspectos de la memoria explícita involucran claramente al hipocampo y a la corteza prefrontal.

¿Como se aplica lo anterior al mundo real del comportamiento humano? ¿Qué papel desempeñan las memorias explícita o implícita en el aprendizaje y posterior ejecución de una composición musical, por ejemplo? Una vez dominada y memorizada, la composición representa una rutina motora aprendida y en gran parte es dominio de la memoria implícita. Simplemente no hay tiempo de pensar en la siguiente nota mientras se interpreta algo. Pese a que el proceso de dominar una nueva pieza musical representa un aprendizaje motor, también requiere la interacción de memoria explícita e implícita. ¿Cómo así? Si Jascha Heifetz no tuviera intacta su memoria explícita, jamás podría recordar de un día para el otro la pieza musical escogida para ensayar, como tampoco recordaría haberla ensayado antes. Tampoco recordaría los logros del día anterior, o ciertos problemas de ejecución que deberían constituir el eje de la sesión de práctica, según el análisis que hubiera efectuado de ensayos previos. De hecho, ni se le ocurriría que debía practicar e, independientemente de sus considerables habilidades técnicas, sería incapaz de emprender el aprendizaje de una nueva pieza sin la ayuda de otra persona que lo dirigiera continuamente. Más de 40 años de estudio han permitido determinar que la memoria implícita, base del aprendizaje de tareas y habilidades, puede disociarse por completo, tanto anatómica como funcionalmente, de la memoria explícita. Pero la verdad es que sin una memoria explícita que nos guíe, prácticamente todo el aprendizaje sería exclusivamente automático y primitivo. La memoria explícita, definida como e! recuerdo consciente, la conciencia subjetiva de que algo se está recordando, suministra el contexto central y la dirección del aprendizaje volitivo y, por extensión, todo lo que "creamos" en nuestro entorno. La interdependencia de estos dos diferentes procesos de memoria sugiere que probablemente evolucionaron Juntos y que comparten la misma historia filogenética :(ver Rovee-Collier. 1997; Gerhardstein et al, 2000).

Acerca de los mecanismos de recuerdo y de adquisición de memorias

Desde hace más de 100 años abundan las especulaciones acerca del sustrato neural del aprendizaje y de la memoria. Al comienzo del siglo xx. Ramón y Cajal, uno de los verdaderos pioneros intelectuales y experimentales de la neurociencia, introdujo la llamada doctrina neuronal, según la cual todos los cerebros son fruto del "cableado" entre células individuales, las neuronas. También propuso que el aprendizaje a largo plazo ocurre por el reforzamiento de las conexiones sinápticas (capítulo 4) y por la generación de nuevas conexiones entre neuronas (Ramón y Cajal, 1911).

Como ya dijimos, recientemente se ha propuesto que la memoria a corto plazo o memoria de "trabajo" se caracteriza porque su actividad se devuelve al mismo circuito neuronal (Goldman-Rakic, 1996; Paulesu et al, 1993). Es algo así como repetir continuamente un número

telefónico para recordarlo mientras se marca, solución alterna un poco mas riesgosa que la de escribir el número. La base de la memoria de trabajo podría ser la actividad eléctrica del momento, producida por la retroalimentación sináptica o por la permanente activación de neuronas debida a sus propiedades intrínsecas (Camperi y Wang, 1998). Se han propuesto buenos ejemplos de memoria de trabajo (Chelazzi et al., 1998; Glassman, 1999) y de mantenimiento de la posición de los ojos al mirar (Hayhoe et al-, 1998; McPeek et al., 1999). Desde los días de Donald Hebb (1953), la memoria asociativa se ha equiparado con la potenciación a largo plazo (PLP) y con la depresión a largo plazo (DLP) (ver Goldman-Rakic et al., 1990 y Goldman-Rakic, 1996, para revisiones). Estos mecanismos se han explicado en cuanto a la habilidad que tienen las sinapsis para modificar la cantidad de transmisor liberado por un potencial de acción presináptico, o en lo relacionado con la capacidad de la célula post-sináptica de producir receptores que hagan a la célula más sensible a la PLP o menos sensible a la DLP. En buena parte el detalle de la implementación de estas modificaciones sinápticas se ha demostrado por primera vez en invertebrados (ver la revisión de Kandel et al, 2000), y muchos de los pasos moleculares involucrados en tales modificaciones ya comienzan a comprenderse en detalle (Kandel et al, 2000).

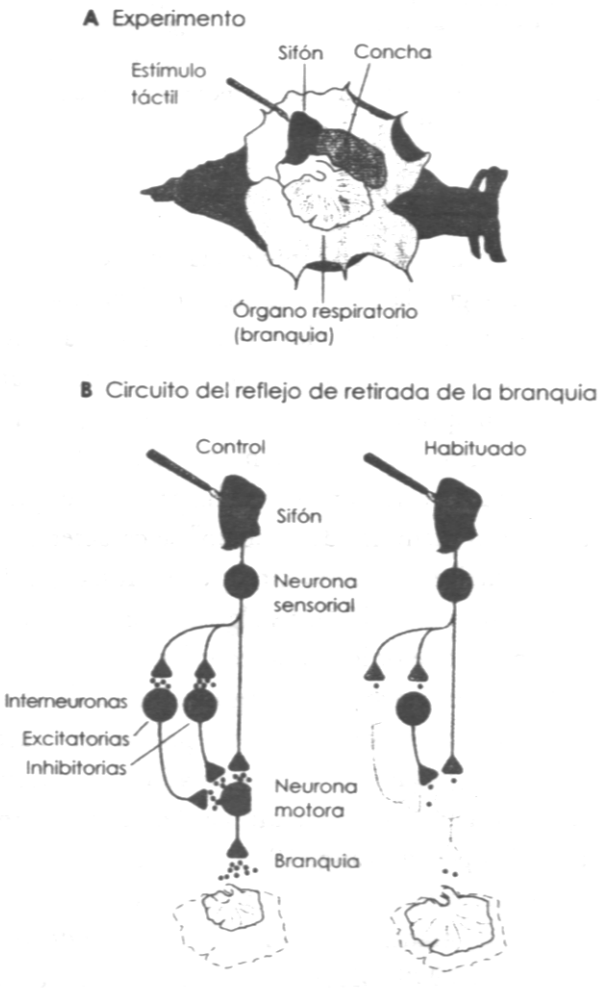


Figura 9.4

Mecanismos celulares de habituación, ilustrados en el reflejo de retirada de la branquia del caracol marino, Aplisia. (A) Vista dorsal de lo aplasia, que ilustra el órgano respiratorio (agallas) normalmente cubierto por una aleta. La aleta termina en un sifón, apertura carnosa que se usa para expeler agua marina y desechos. Los estímulos táctiles en el sifón desencadenan el reflejo de retirada de la agalla. La estimulación repetida lleva a la habituación. (B) Simplificación del circuito con los elementos clave involucrados en el reflejo de retirada de la agalla, así como los

sitios implicados en la habituación. Este circuito tiene unos 24 mecanorreceptores en el ganglio abdominal que inervan la agalla y diversos grupos de interneuronas excitatorias e inhibitorias, las cuales hacen sinopsis en las neuronas motoras. (Aquí sólo se muestra una neurona de cada tipo.) La estimulación repetida del sifón lleva a la depresión en la transmisión sinóptica entre las neuronas sensoriales y motoras, así como entre ciertas interneuronas y las células motoras. (Tomado de Kandel et al. 2000, figura 63-1, p. 1248.)

Independientemente de nuestros esfuerzos en la vida, los detalles del flujo de corriente eléctrica a través de las membranas neuronales que constituyen nuestro aprendizaje (o el recuerdo de lo aprendido) son algo que no podemos transmitir a nuestra descendencia, al menos no de la misma manera como transmitimos los genes familiares que dan la forma a la nariz, el color de los ojos o la predisposición a la corpulencia. ¿Por qué lo que se aprende durante la ontogenia no logra filtrarse a la siguiente generación por vía del DNA familiar? ¿Por qué no lo hace, particularmente si la repetición parece haber anclado de manera muy sólida cosas como la lengua materna, el sentido del sí mismo, cosas con las cuales convivimos todos los días de nuestra vida?

Memoria filogenética y referencial

La razón de que nuestras memorias no se transfieran se basa en el concepto que tenemos del tiempo y en la definición que damos a lo filogenético por oposición a lo referencial. Cuando juzgamos que algo es significativo, sólo podemos determinarlo desde la perspectiva del asiento de la predicción, desde el "sí mismo" y de lo que el "sí mismo" ha experimentado y yuxtapuesto en el curso de una vida. Pero esto no es lo que la selección natural considera notable o preservable. ¿Qué es lo que consideramos significativo en la vida? Repasamos los recuerdos —el grado, determinada mañana de Navidad, el nacimiento de un hijo— como si estuvieran archivados ordenadamente en una especie de agenda emocional, junto con algunos eventos de la niñez que nos acompañarán toda la vida.

Pero aunque tales eventos claramente marcan nuestra vida, de hecho son nuestra vida, significan muy poco para la evolución biológica, por ser demasiado variables y específicos en el ámbito individual, y prácticamente carentes de impacto en la especie como un todo. Además, no son lo suficientemente repetitivos, coherentes o frecuentes como para que la filogenia o la selección natural los incorpore al plano genómico. Desde el punto de vista de la especie, la memoria individual a largo plazo es tan sólo memoria a corto plazo, de análoga manera a lo que es la memoria inmediata para el individuo, con la diferencia de que la memoria individual a largo plazo sólo puede mantenerse gracias a la cultura social. La memoria genética (en relación con la especie, memoria a largo plazo) se halla presente desde el nacimiento, como memoria que ocurre en ausencia de experiencia sensorial. Tales memorias se inscribieron directamente en nuestro código genético mediante una constelación de pequeñas mutaciones del genoma en el curso de los tiempos que salen a la luz por selección natural. La práctica no incide en las adaptaciones útiles que se tornan genómicas. Heredamos los dientes y, por más que nos dediquemos a comer únicamente alimentos duros para fortalecerlos, este esfuerzo no tendrá impacto en los dientes de nuestros hijos. Una sola vida no da para más, a menos que durante milenios se pruebe que los dientes más fuertes aumentan la reproducción, o sea que hubiera una selección positiva a favor de estas mutaciones aleatorias, que al aumentar la capacidad de consumir ciertos alimentos, facilitaran la supervivencia y la producción exitosa de crías viables. Por eso tenemos nuestros dientes y por ende su forma (ver, por ejemplo, Brown, 1983; Krishtalka et al-, 1990; Plazcan, 1993; Stock et al., 1997).

Las mismas diferencias entre memoria filogenética y ontogenética se observan en el lenguaje humano. Obviamente cualquier forma de comunicación intraespecie aumenta la supervivencia, sin ser excepción en el caso de los humanos. En el capítulo 10 se tratará en detalle cómo y de dónde emergió el lenguaje humano. Por ahora, baste con decir que el hecho de tener

lenguaje es una propiedad del sistema nervioso presente desde el nacimiento, un a priori filogenético. Desde el momento de nacer, la percepción de fonemas comienza a reducirse rápidamente a los que se utilizan en la lengua materna del niño. Es difícil identificar correctamente los sonidos específicos de idiomas a los que no hemos sido expuestos en la niñez (Kuhl et ai, 1997). La lengua materna se adquiere mediante reglas lingüísticas pre-especificadas (Chomsky, 1980), por un proceso selectivo de uso y repetición (Jusczyk y Bertoncini, 1998;Locke, 1990; Wexler, 1990; Greentíeld y Savage-Rumbaugh, 1993; Werker y Tees, 1999). Sin embargo, no es ni la práctica ni la repetición lo que nos permite el lenguaje, pues éstas sólo confieren el modo particular de utilizarlo. Si la memoria fílogenética fuera lamarckiana, los niños de Francia nacerían con predisposición para hablar francés, y no existe esa predisposición genética en el lenguaje humano. En una palabra, la "cultura" no es lo suficientemente antigua o consistente como para que la selección natural le ponga atención.

Conocimiento en ausencia de experiencia

En lo que atañe al cerebro y al cuerpo, hemos de funcionar con lo que tenemos y con lo que somos. La mayor parte de esta conectividad es muy específica y se adquiere en ausencia de experiencia, lo que significa que durante la ontogenia se generan circuitos cerebrales funcionalmente capaces y correctos, sin ninguna entrada sensorial. Por ejemplo, en el sistema visual de los mamíferos, el ojo mismo y toda la conectividad funcional, que en último término soportará la visión, se construyen en ausencia total de entrada luminosa, pues tal conectividad intrínseca se forma en el animal in útero. Hace muchos años, David Hubel y Torsten Wiesel describieron que en un mono recién nacido y que por ende nunca había visto rayas, las neuronas de la corteza visual responden selectivamente a líneas en determinadas orientaciones y a la dirección del movimiento. (Hubel y Wiesel, 1963, 1974, 1977; Wiesel y Hubel, 1974; Hubel et al., 1976.) Este experimento demuestra que no es correcto decir que el cerebro "aprendió", sino que su conectividad neuronal ha sido especificada y dirigida por factores del aprendizaje (por experiencia). Muy probablemente estos factores derivaron, tanto de las propiedades intrínsecas eléctricas de las células pertinentes (recordemos que en los capítulos 2 y 3 vimos cómo la motricidad se remontaba por el neuroeje) como de la presencia oportuna de factores de crecimiento nervioso y de las interacciones entre fibras axónicas migratorias y las respectivas neuronas que reciben sus terminales. Tales células receptoras pueden aceptar o rechazar el acceso a sus receptores, permitiendo o rechazando determinados eventos de unión de célula a célula. Es muy importante señalar que todos estos eventos mencionados constituyen el preludio ontogenético de la transmisión sináptica sensorial proveniente de los sentidos.

Este escenario es un golpe contundente contra el concepto de la función cerebral como una tabula rasa, según el cual la conectividad neuronal subyacente a ciertas funciones específicas es el resultado de la experiencia sensorial. No es posible que ocurra en el cerebro o sus circuitos una experiencia sensorial en ausencia de una transmisión sináptica evocada por los sentidos. Esto debe distinguirse de la actividad eléctrica espontánea que se observa aun en ausencia de estímulos a los órganos sensoriales, como sucede, por ejemplo, con el ojo, en donde las neuronas de la retina disparan espontáneamente antes del nacimiento. Esta actividad es necesaria para establecer el "alambrado" normal del sistema visual (Penn et al, 1998; Cook et al,, 1999;Eglen, 1999) y no es manejada por la presencia o ausencia de estímulos externos específicos.

Qué cambios ocurren cuando aprendemos

En el curso de la vida, a estos patrones preordenados se les añaden modificaciones subyacentes al aprendizaje y a la memoria, como nuevas conexiones y cambios en las proteínas que influencian la eficiencia específica sináptica. Empero las modificaciones y adiciones susceptibles de medirse, como son los cambios en el cono y en la densidad muscular provocados por el ejercicio y el uso, son mínimas, si se las compara con lo que hacemos con ellas desde el

punto de vista del comportamiento. Si se compara la arquitectura neuronal y la composición molecular de las células de las áreas corticales del lenguaje de alguien que sólo hable francés con las de alguien que sólo hable español, las diferencias son prácticamente imposibles de detectar. Sin embargo, cada uno de esos idiomas representa mundos enteramente diferentes para la persona entrenada en el otro idioma. A pesar de recientes evidencias a favor de la existencia de la neurogénesis (generación de nuevas neuronas) en el cerebro primate maduro (Gould et al, 1999), ontogénicamente el aprendizaje y la memoria constituyen tan sólo leves modificaciones en los elementos o módulos de la arquitectura funcional, la cual viene determinada por la filogenia desde el nacimiento.

Por tanto, si me preguntan en qué medida el cerebro está "precableado" por la naturaleza y en qué medida se modifica por la experiencia del aprendizaje, mi respuesta sería que la mayor parte del sistema está determinada genéticamente. Esta línea de pensamiento se apoya en razones muy poderosas, como el trabajo ya mencionado de Hubel sobre la visión, de Mountcastle sobre los sistemas somatosensoriales (Mountcastle, 1979, 1997, 1998) y de Chomsky sobre el lenguaje (Chomsky, 1959, 1964, 1986).

Los circuitos cerebrales básicos para estas funciones no se adquieren por aprendizaje. Si, durante el desarrollo, el aprendizaje modificara sustancialmente la conectividad central, la neurología como tal sería imposible, porque la función normativa del cerebro en último término modificaría la estructura cerebral en cada individuo, al punto que sería imposible saber dónde se ubica la corteza visual o cualquier otra función en particular en las diferentes personas. Recordemos además que en general, la alineación de los ojos no es perfecta, porque los dos lados de la cabeza no son completamente simétricos y, además, porque la morfología de los ojos y de los músculos que los mueven tampoco es igual. En efecto, los ojos en reposo pueden no estar exactamente orientados hacia el mismo foco (ver Braddick, 1996, para una discusión sobre el desarrollo de la binocularidad en el recién nacido). Sin embargo, al mirar algo, en general los ojos se alinean de manera exquisita y se realinean según que observemos un objeto de cerca o de lejos (ver Miles, 1999, para una discusión sobre los mecanismos de estabilización visual). Es sabido que la ingestión de suficientes cantidades de algunas sustancias que alteran la función del sistema nervioso, como el alcohol, puede ocasionar visión doble (Millar, 1992) (diplopia), lo cual ocurre porque la alineación de los ojos deja de ser perfecta.

El sistema nervioso es claramente capaz de corregir tales desviaciones, pero sólo dentro de ciertos limites. Hay personas estrábicas (bizcas) por traumas periféricos o por defectos congénitos en el "cableado". Si la desviación es demasiado grande, el sistema nervioso no logrará hacer la corrección, como lo atestiguan los numerosos niños que, de hecho, carecen de percepción de profundidad (estereopsis) por estrabismo congénito (Archer et al, 1986; Weinstock et al., 1998). Es decir, el sistema puede modificar levemente la capacidad inherente de aprender o de corregir errores, pero dentro de un rango bastante limitado y siempre a expensas de otra función. Es análogo al caso de los atletas cuya alta especialización en un deporte necesariamente los lleva a perder competitividad en otro tipo de deporte. Por iguales razones, hay muy pocos virtuosos en más de un instrumento musical y nadie es virtuoso en todos los instrumentos.

Pero de nuevo el mejor ejemplo lo proporciona la adquisición del lenguaje, en particular la de los fonemas característicos de determinado idioma (ver Winkler et al., 1999). A menos que se aprendan durante un período particular, la posibilidad de adquirirlos o retenerlos con eficiencia se pierde de manera irreversible (Kuhl et ai, 1997; Kuhl, 2000). De lo anterior se deduce que es posible aprender un idioma, pero a costa de la capacidad de aprender otros idiomas con la misma eficiencia (Logan et al., 1991). Se trata de un debate polémico, pues hay quienes consideran que hablan con la misma fluidez, acento específico y elocuencia en más

de un idioma. Sometidos a un escrutinio riguroso, este poliglotismo verdadero rara vez se cumple. Así mismo, se debe considerar que el lenguaje sólo se puede comprender y emitir a cierta velocidad; si la rapidez del habla se incrementa por tan sólo diez veces, su comprensión o emisión resultará imposible (Llinás et al-, 1998). Esto implica que el lenguaje está altamente

predeterminado, como lo están los límites fuera de los cuales nos resulta imposible aprenderlo o adaptarnos a él. Visto así el problema, entendemos que estamos realmente limitados a utilizar lo que ya sabemos, lo mismo que el rango de adaptabilidad en una función en particular (debido a que nuestro "cableado" filogenético es inalterable). Tales límites se aplican a todo aquello que hacemos o aprendemos.

Los requisitos del aprendizaje otorgados por la naturaleza

Aunque nos resulte molesto, el hecho es que el "sí mismo" es fundamentalmente tan sólo una estructura funcional útil, generada por parte del sistema nervioso para centralizar y por tanto para coordinar sus propiedades predictivas. Nosotros, nuestros "egos", podríamos resentimos al pensar que el aprendizaje y aquello que como consecuencia de él se graba en la memoria sólo nos es dado gracias al perfeccionamiento de propiedades que estaban ya presentes en el sistema nervioso al nacer.

Además, este proceso de perfeccionamiento que podemos medir en lo referente a los cambios en el número de contactos sinápticos en ciertos circuitos y en la eficiencia de algunos de ellos es diminuto, si se lo compara con la magnitud de los eventos que funcionalmente derivan de tales cambios. Ejemplos de ello son los idiomas que aprendemos, la gente y sitios que recordamos y la educación específica lograda desde tiempo atrás y que seguimos utilizando todos los días. Pese a que los núcleos olivares inferiores y las vías visuales parecen similares, las memorias visuales nunca son exactamente iguales entre una persona y otra. Dada la diversidad de imágenes sensomotoras acumuladas en la vida, sería de esperar que las modificaciones fisiológicas en el cerebro fueran mucho más sustanciales, pero, en verdad, los cambios sinápticos reales producidos por estas memorias son mínimos. Fisiológicamente, las limitaciones para aprender son parte de aquello que nos define como parte de una comunidad. Si no se prefijaran límites fisiológicos para la velocidad a la cual el lenguaje se percibe, nunca se hubiera seleccionado la esencia común, que permitió que el lenguaje se desarrollara en los humanos. La filogenia determina que la percepción del color sea prácticamente igual para todos nuestros sistemas visuales. El valor de este tipo de limitaciones impuestas sobre el aprendizaje y la memoria es tan importante para nuestra interacción como especie como lo es la capacidad de aprender. Esas limitaciones nos igualan y nos hacen una tribu, la tribu humana.

El aprendizaje es un medio para facilitar que la función del sistema nervioso se adapte a los requisitos de la naturaleza, del mundo en que vivimos. Aunque a primera vista los detalles del mundo externo parecen pertenecer al dominio ontogénico, probablemente son las características filogenéticamente prefijadas del organismo las que permiten darle el significado al detalle, al ámbito de lo que "está sucediendo ahora". Por ejemplo, si un animal no digiere la hierba y desea sobrevivir, tendrá que aprender a cazar otros animales, necesidad que se ilustra patentemente en la adquisición de habilidades de caza por parte de los carnívoros.

El león que atacó exitosamente al recién nacido también fue joven un día. Aunque los fundamentos de las habilidades de caza que empleó eran innatas, tuvo que aprender de su madre los detalles, la táctica de la depredación carnívora dependiente del contexto.

Durante su desarrollo, los cachorros deben aprender muchas habilidades de caza, lo cual se realiza en interacciones de jugueteo con sus hermanos de carnada, durante las cuales aprenden los parámetros de abalanzarse sobre algo, dar zarpazos, morder y los modos exitosos de cómo someter a otro animal. También aprenden los límites de tales habilidades, cuando el juego deja de ser juego, cuando morder y dar zarpazos duele o da miedo.

Lo anterior se aprende en gran parte directamente, mediante sensaciones táctiles. Pero los cachorros también aprenden de modo teleceptivo, mirando cómo lo hace la madre o más probablemente un grupo de madres, las cuales los llevarán a una caza real, dejándolos mirar a distancia o acercándolos y quizás dejándolos participar sin que corran peligro. Es entonces cuando los cachorros aprenden las diversas tácticas de la caza: arrastrarse y lanzarse sobre un pájaro es muy diferente de perseguir y derribar a otro animal. También es cuando aprenden

indirectamente cómo funciona el cerebro de otro animal: aprenden acerca de los patrones típicos de la carrera de la gacela; que el jabalí salvaje probablemente dará la vuelta y atacará a su vez; que la postura corporal y la atención de la serpiente indican que morderá ahora mismo. Es así como los cachorros desarrollan sus habilidades predictivas, habilidades necesarias para la supervivencia.

Esto lleva a una conclusión muy interesante acerca de la evolución, que probablemente el lector ya habrá deducido. En el capitulo 3, vimos en detalle que los organismos con sistema nervioso necesitan moverse activamente dentro del mundo externo, para interiorizar sus propiedades sobresalientes en su espacio funcional propio. El examen del desarrollo del manto cortical en diversas especies indica que los animales con los circuitos nerviosos más sofisticado son los carnívoros y no los que pastan, los herbívoros. Tanto desde el punto de vista filogénico, como ontogénico, lo anterior es muy comprensible: los animales que compiten reñidamente por la comida deben tener a mano un repertorio mucho más amplio de tácticas para procurarse alimento, para no mencionar que en la mayoría de los casos la comida no se obtiene sino a través de una lucha estereotipada específica de la especie. La interacción de tales animales con su mundo es mucho más refinada, lo cual se refleja necesariamente en los sistemas cerebrales que soportan dicha interacción. Una vez más el "alambrado" pre-establecido, la filogenia, otorga la capacidad, y luego la práctica, la ontogenia, la perfecciona.

Impronta

Otro maravilloso ejemplo de las propiedades del aprendizaje es un fenómeno generalizado y crucial para la supervivencia, llamado "impronta" (Lorenz, 1935,1937;Tinbergen, 1951; Bateson, 1966) (figura 9.5) o "aprendizaje perceptual" (Bateson, 1966). La impronta se ha estudiado en detalle, particularmente en las aves. Se trata de situaciones en las que ciertas propiedades del mundo externo definen la conectividad central intrínseca. Por ejemplo, para un pato recién nacido, la unión de cierto sonido con un indicio visual significará para siempre el concepto de "madre". Intuitivamente es razonable pensar que la impronta de "madre" se efectúe una única vez, pues en nada ayudaría al recién nacido que diferentes eventos externos significaran madre. –

Figura 9.5

Konrad Lorenz nadando con gansos que de polluelos habían establecido una impronta en él. Ver el texto para mayores detalles.

El polluelo necesita de su madre y necesita que "el concepto madre" coincida con su madre real. El hecho de que sólo una combinación de estímulos tenga ese significado es una propiedad intrínseca de los circuitos que interiorizan esta representación materna. En último término, lo que llega a configurar la imagen de la madre es una propiedad de atracción, lograda mediante la repetición de determinada secuencia de estímulos — oír "cuac", orientarse hacia el "cuac", ver a esa ave grandota, la que a la larga se incorpora como el concepto de "madre", existiendo para ello un período sensible, de tiempo muy corto, en el cual !a repetición de tales secuencias o combinaciones de estímulos logra interiorizarse. Patos aislados y privados de estímulos sensoriales desde el nacimiento nunca aprenderán el concepto de madre. Transcurrido este período, aunque se presente al polluelo su madre real, al no haber interiorizado tal concepto, incluso la madre real ya nunca significará "madre" (Hess, 1972).

Para sobrevivir, las propiedades de atracción de los circuitos neuronales pertinentes son y deben ser muy fuertes durante el período crítico de aprendizaje: ante todo, el polluelo necesita reconocer a su madre como lo más importante en este mundo. En ausencia de madre real durante el período crítico, el polluelo hará "impronta" de madre con cosas como un zapato, un balde o cualquier objeto que se presente repetidamente, si se genera un sonido concomitantemente. En estas condiciones (experimentales), aun frente a la madre real que lo llame afanosamente, el polluelo seguirá al zapato que alguien hala de una cuerda, porque en cuanto a lo que el polluelo conoce, eso es madre y "debe seguir a la madre".

Cabe preguntarse por qué, inadvertidamente, los polluelos silvestres no hacen impronta de madre con otras secuencias de estímulos — con otras cosas. Es posible que esto suceda, pero la probabilidad de hacer impronta con la madre real es sumamente alta. El repertorio de eventos sensoriales a los que está expuesto el polluelo recién nacido es muy limitado (no se mueve mucho a menos que la madre esté cerca). Dentro de estas limitaciones, la mayoría de los detalles sensoriales se originan en interacciones con la madre real. Así, casi siempre la naturaleza cumple con su deber y normalmente los polluelos terminan junto a las madres correctas.

Un aspecto muy interesante de lo anterior es la interacción funcional de estos circuitos, que permite interiorizar las combinaciones de estímulos sensoriales, a partir de los cuales emerge el concepto de madre. Idéntica cosa ocurre con el flujo continuo de conectividad sináptica, a la cual se aludió, cuando una sombra significaba un predador, lo cual a su vez significaba escape, lo que repetido muchas veces resume eficientemente el proceso a un mero:

"sombra significa activar el PAF de correr". De esto ya se habló en el capítulo 6 al mencionar la interacción y acople de diversos estímulos sensoriales en una sola estructura perceptual unificada. Lo mismo ocurre con el aprendizaje del concepto de madre. Lo fascinante de todo esto es que una vez interiorizado como concepto puede activarse en su totalidad a partir de uno solo de los componentes sensoriales de todo el conjunto. Es decir, el "cuac" de la madre, cuando el polluelo no la puede ver, significa "la madre" y hay que buscarla.

La impronta no se limita a la madre. Por ejemplo, en la naturaleza los patos de una misma carnada harán impronta con sus hermanos y con su madre (Dyer et al, 1989; Dyer y Gottlieb, 1990). La impronta es algo que todos hacemos, o mejor, que nuestros sistemas nerviosos hacen. Un amigo y colega mío, médico muy conocido y respetado, hablaba de un incidente que vivió en la segunda guerra mundial. El buque en el cual prestaba su servicio en la armada tenía un fuerte olor a la pintura usada en él. Muchos años después, al oler esa pintura particular —en cualquier sitio y condición— oye el ruido de los motores del buque. Es claro el aspecto de interacción entre los circuitos que integraron la estructura inicialmente: si los sentidos captan uno de los componentes, el sistema resuena en todos los demás aspectos, recreando la imagen interna sensomotora completa, o sea toda la estructura. Estos Componentes sensoriales interrelacionados de una misma estructura funcional residen en muy diversas partes de la corteza y es la resonancia neuronal la que los recombina para nosotros.

Kiki Smith. Mi Lago Azul, 1994, Fotograbado y monoimpresión, 108 x 135,9cm: edición de 41 .Fotografía de Ellen Page Wilson. Cortesía de Pace Wildenstein

10

LAS CUALIAS DESDE EL PUNTO DE VISTA NEURONAL

El exorcismo del fantasma en la máquina

El término "cualia" se refiere a la calidad de las entidades. El filósofo Willar Quine empleó el término para denotar el carácter subjetivo de la sensación. En las siguientes páginas lo emplearé para referirme a cualquier experiencia subjetiva generada por el sistema nervioso (Smart, 1959), como por ejemplo el dolor (Benini, 1998), el color (Churchland y Churchland, 1998), o el tono específico de una nota musical (para discusiones generales, ver Gregory, 1988, 1989; Leeds, 1993; Sommerhoff y MacDorman, 1994; Banks, 1996; Hubbard, 1996; Feinberg, 1997). También es un tema de profundo interés para la filosofía (Churchland, 1986;Searle, 1992, 1998; Denté, 1993; Chalmers, 1996, entre otros).

Hoy en día, hay dos posiciones afines respecto de la naturaleza de las cualias. Según la primera, éstas serían un epifenómeno "necesario para la conciencia (Davis, 1982). La segunda, que no es muy diferente de la primera, plantea que si bien las cualias son la base de la conciencia, éstas aparecieron sólo en formas superiores de la evolución, por lo cual representarían una función central superior presente sólo en los cerebros más avanzados (Crook. 1983). Esta perspectiva relega a ámbitos carentes de toda experiencia subjetiva a animales inferiores como las hormigas. Ello implica que los circuitos de estos animales son automáticos y que se organizan de manera refleja, lo cual les permite una interacción con el exterior que, no por exitosa para sobrevivir, deja de ser eminentemente refleja. Para efectos prácticos y pese a su éxito evolutivo, las criaturas primitivas como las hormigas y las cucarachas serían autómatas biológicos.

La perspectiva elitista, según la cual sólo las formas superiores están dotadas de cualias, dan otras razones: las cualias se originaron accidentalmente, como resultado inesperado y posiblemente como una propiedad emergente de circuitos cerebrales complejos, pero no como necesarias para un comportamiento debidamente organizado. Los partidarios de esta posición señalan que, incluso en aquellos seres dotados de cualias como los humanos, la mayoría de los eventos cerebrales no forman parte de ellas, y que, a su vez, ellas no son parte de la mayoría de los eventos cerebrales. Estos autores se inclinan a pensar que gran parte de la actividad cerebral se relaciona con funciones preconscientes o con los mecanismos neuronales que coordinan el movimiento. Finalmente, señalan que los aspectos funcionales en principio están basados en la experiencia sensorial de la función cerebral, no se emplean frecuentemente y no son necesariamente base de la conciencia, en particular cuando el sujeto se distrae momentáneamente. Mientras usted goza de un partido de tenis, le roban la billetera. Más tarde recordará que sintió algo en la cadera o cerca del bolsillo de la chaqueta. Estos puntos de vista indican que las cualias no son componentes o productos necesarios de la función cerebral y que, si ocasionalmente lo fueran, son esencialmente fugaces y poco confiables.

Para mí, a estos modos de pensar les falta una perspectiva evolutiva adecuada, razón, tal vez, por la cual a las cualias se les ha puesto tan poco énfasis dentro del estudio de la función cerebral.

Comprendemos a cabalidad que la arquitectura funcional del cerebro es producto del lento devenir de la evolución, la cual selecciona las funciones cerebrales más útiles para la supervivencia de las especies. Lo que no es tan claro para muchos es la íntima relación entre las cualias y la estructura evolutiva funcional del cerebro. Mi razonamiento es que la existencia misma del sistema nervioso central se origina en la experiencia sensorial, la cual, gracias a la predicción, permite el movimiento activo (motricidad). Considerando que la evolución de la percepción misma en cualquier modalidad sensorial dio lugar al elaborado proceso que vemos hoy en día, entonces lo más lógico es plantear que la experiencia sensorial, las cualias, deben ser primordiales para la organización global del sistema nervioso. De hecho, las cualias deben haber

desempeñado un papel relevante e influyente en el curso de la evolución. A continuación me extenderé sobre este punto.

La biología evolutiva nos indica que, al madurar, algunas funciones del sistema nervioso migran de un sitio a otro dentro del cerebro. Durante la ontogenia y también a lo largo de milenios de evolución, una función puede desarrollarse lejos de su sitio de origen. Esta migración de funciones sólo es posible si lo que migra es el conjunto total del complejo neuronal de dicha función.

Desde el punto de vista ontogénico, el mejor ejemplo de migración funcional es la oxigenación de los elasmobranquios durante la embriogénesis (Harris y Whiting, 1954). Se recuerda que, debido a los acoples electrotónicos, el temblor intrínseco de la musculatura .produce un movimiento rítmico y oscilatorio que permite el flujo de agua por las agallas y el intercambio de oxígeno con el exterior a través del saco vitelino. Se trata de un tipo de motricidad "miogénica", porque representa un movimiento engendrado meramente a partir de las propiedades intrínsecas de las células musculares.

¿Cuál es la relación entre la migración de estas funciones y las .cualias? Ya mencionamos que durante la filogenia el extremo anterior o polo cefálico (rostral) del animal se enriqueció con órganos sensoriales que migraron hacia él, en lugar de haberlo hecho hacia los pies o la cola. ¿Por qué? Porque la dirección que la evolución eligió para el movimiento del animal es "hacia adelante". Evolutivamente, es lógico que los órganos sensoriales migren hacia allí, en donde, combinados con otros, se aprovechen al máximo.

Así, de la necesidad de "monitorear" sensorialmente el mundo por el cual puede moverse, y a causa de la dirección frontal del movimiento, los órganos sensoriales florecieron en el polo cefálico. Estos órganos sensoriales no sólo se volvieron más capaces para informarse sobre el mundo exterior, sino que los centros nerviosos asociados a ellos se especializaron para realizar de manera rápida las decisiones predictivas que llevan a realizar y mantener comportamientos holísticos cruciales para la supervivencia. Pero fundamentalmente la experiencia sirve para contextualizar y despertar la unidad de la activación sensorial, en un estado funcional global (algo como "yo siento"), que actúa para tomar decisiones. Aun más, es claro que las cualias primitivas migraron desde regiones caudales al encéfalo, donde tomaron asiento e impulsaron una conectividad neuronal cada vez más compleja. Entendiendo lo anterior, me parece que las cualias, las experiencias sensoriales, deben haber sido una de las propiedades fundamentales del ensamblaje neuronal que dio lugar al desarrollo evolutivo del sistema nervioso central. Si las cualias tuvieron ese destacado lugar en el desarrollo filogenético del sistema nervioso central, es difícil de aceptar que ellas actualmente no desempeñen un papel, o que por lo menos éste no sea importante y preponderante en el funcionamiento de nuestro cerebro durante el transcurso de nuestra vida. Más adelante discutiremos la importancia de las cualias y su necesidad crítica. Por ahora estudiemos las cualias, lo que son, o lo que deben ser, desde una perspectiva fisiológica objetiva.

Localización de las cualias

En el curso de las cirugías para epilepsia intratable, Wilder Penfield estimulaba eléctricamente diversas partes del cerebro de pacientes y les preguntaba acerca de lo que sentían con la estimulación. Aunque la corteza cerebral se halla expuesta y el paciente está despierto, no experimenta ningún malestar y puede informar lo que siente. Penfield encontró (además de contracciones en las piernas, dedos y labios al estimular diferentes sitios del homúnculo motor) que era posible evocar experiencias sensoriales muy específicas al estimular eléctricamente la corteza sensomotora y las distintas localizaciones corticales que se le asocian (Penfield y Rasmussen, 1950) (figura 10.1). Dependiendo de la corteza estimulada, los pacientes "oían" fragmentos de canciones familiares o de voces, o "veían" a algún familiar o evocaban alguna imagen del pasado.

Tales sensaciones quizás no eran tan completas como las que se experimentan con la

activación real de las vías sensoriales, con la experiencia directa de eventos externos o también con la evocación consciente de un recuerdo. Sin embargo, el simple pulso de electricidad aplicado a áreas minúsculas de la corteza genera o configura sensaciones semejantes a una experiencia real. Neuronalmente hablando, existe un carácter modular acerca de la experiencia sensorial.

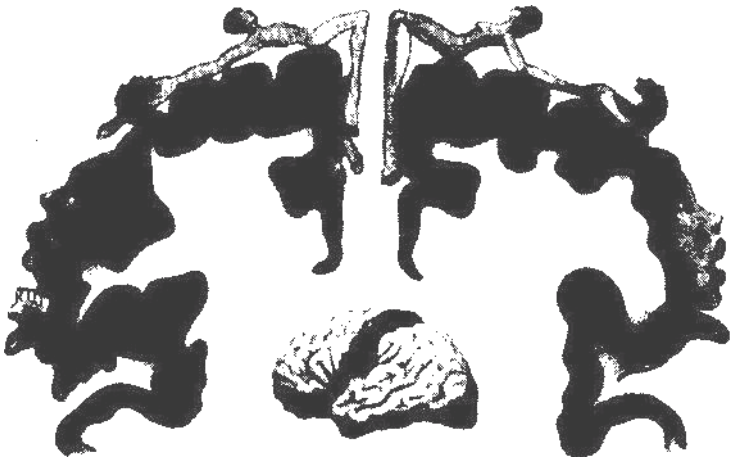


Figura 10.1

Famosos mapas dibujados por Wilder Penfield, que muestran la representación de los diferentes partes del cuerpo en dos bandas de la corteza cerebral la corteza somatosensorial (izquierda) que recibe sensaciones de tacto (denominado "homúnculo sensorial"! y la corteza motora (derecha) que controla el movimiento ("homúnculo motor"). En ambos mapas, los dedos, la boca y algunas otras áreas muy sensibles ocupan la mayor parte del espacio. (Tomado de Posner y RaichIe, 1995.)

También es posible, por ejemplo, estimular el índice derecho del paciente cuya corteza ha sido expuesta, y examinar la actividad neuronal generada por tal estimulación en el área correspondiente de la corteza somatosensorial.

"¿Qué estimulamos?", pregunta el doctor. "Mi Índice derecho". La actividad registrable de las células de esta parte de la corteza también muestra que sí, que de hecho se estimuló el índice derecho.

Y ahora se puede demostrar un fascinante fenómeno, pues si anestesiamos la corteza somatosensorial o los núcleos talámicos, relacionados específicamente con esta vía de información táctil (como durante el procedimiento conocido como la prueba de Wada, para ubicar el centro del habla durante la neurocirugía), al estimular el mismo sitio y preguntarle qué sintió, inevitablemente escucharemos del paciente: "Usted no ha estimulado nada todavía". Sin introducir ningún cambio en la conectividad física o en la anatomía, la aplicación del anestésico hizo desaparecer de manera completa e inmediata la sensación, la experiencia sensorial específica. Si la anestesia local es capaz de eliminar la sensación, por fuerza las cualias han de relacionarse fundamentalmente con la actividad eléctrica del cerebro, ya que la anestesia sólo modificó el aspecto de la función neuronal relacionado con la capacidad de generar patrones particulares de actividad eléctrica.

Teóricamente hay razones de muchísimo peso para pensar que el fundamento de las cualias se encuentre en fenómenos eléctricos neuronales. Consideremos la increíble rapidez con la cual un estímulo sensorial puede analizarse y entretejerse en el fluir de la conciencia. Recordando la activación cerebral oscilatoria de 40Hz .y su relación con la actividad intrínseca tálamo-cortical, vimos que cuanto" de cognición puede medirse como una época temporal bien definida de 12-15 milisegundos. Ello significa que la capacidad del sistema nervioso central para discriminar que dos eventos sensoriales están separados temporalmente requiere un intervalo mínimo de 12,5 milisegundos entre ambos, o de lo contrario el cerebro los registrará como uno solo

(Kristofferson, 1984; Llinás y Pare, 1991; Llinás y Ribary, 1993; Joliet et al-, 1994). Este "cuanto de cognición" implica la activación de patrones de actividad en millones o incluso en cientos de millones de células. Por tanto, el único medio que tendrían las células de generar una coherencia tal sería usando la electricidad como modo de conexión del flujo de información entre ellas. ¡No existe otra manera, que sepamos, para que las células se interconecten (dentro del cerebro) que, siquiera remotamente, sea tan rápido como el anterior! Al examinar los posibles eventos biológicos que suceden en el interior y alrededor una sola neurona, una actividad de conjunto que abarque o emplee cientos de millones de células con un marco de referencia temporal de 12-15 milisegundos impone serias limitaciones sobre el posible modo de transmisión de esta indispensable información. La difusión es exageradamente lenta y su efecto demasiado corto. con los marcos de referencia temporales ya mencionados, si la información se transmitiera por difusión, las moléculas no podrían distanciarse mucho fuera de la célula o, para el caso, dentro de ésta. La electricidad es el único medio suficientemente rápido y con un alcance suficientemente amplio, capaz de permitir la actividad de conjunto de manera rápida y generalizada. Esta actividad es la base de la experiencia sensorial, y su percepción se enmarca dentro de limitaciones temporales, como las que concibiera Charles Sherrington en el "telar encantado" (1941, p. 225). Aceptamos pues, que las cualias se desencadenan gracias a la actividad eléctrica en el cerebro y que están constituidas por eventos muy cercanos en el tiempo a las estructuras eléctricas que se deslizan sobre la superficie de las membranas neuronales. Estos torbellinos eléctricos estallan en zigzag en diferentes direcciones, como relámpagos que centellean, dejando tras ellos un débil y fugaz resplandor —, una sensación que se encenderá de nuevo en cuanto se desencadene y generalice la siguiente oleada de relámpagos, dejándonos la imagen de una red continua de sensaciones. Las cualias realmente son eventos celulares fugaces y discontinuos, por las mismas razones fisiológicas por las cuales la conciencia en sí es un evento fugaz e intermitente. Al final del capítulo veremos que las cualias se relacionan con el "sí mismo" y, específicamente, con el hecho de que nos percatamos de nosotros mismos.

Habiendo relacionado las cualias con los eventos neuronales eléctricos, se plantean otros puntos. Para los eventos funcionales globales del sistema nervioso central, como la vigilia o el sueño, no sólo es indispensable la actividad eléctrica, sino que también es indispensable que sus frecuencias sean muy específicas, tal como se detalló en el capítulo 6 cuando examinamos la conectividad y la función tálamo-cortical. Vemos que el llamado sueño no-MOR (dormir sin soñar) es un estado funcional caracterizado por una actividad de ondas delta lentas y sincrónicas (Llinás y Ribary, 1993). El rango de frecuencia de todo este patrón de actividad rítmica es de 0,5 a 4 Hz y su amplitud en el EEG o MEG (magnetoencefalograma) es la mayor de todas las que se registran en el cerebro. En el capítulo 6 vimos que durante el sueño profundo el sistema tálamo-cortical no acepta casi ninguna modalidad de entrada sensorial. Aunque las vías sensoriales transmiten la información sensorial específica, el sistema no le presta significado interno; de hecho, no existe experiencia sensorial alguna. ¡Las cualias dejaron de existir temporalmente!

Así mismo, las cualias también dejan de existir durante las crisis de la epilepsia tipo "pequeño mal", simplemente porque en el estado epiléptico se modifica la frecuencia fundamental de la actividad cerebral, aunque el resto de la conectividad básica que permite la función neuronal permanece intacta. Toda la experiencia sensorial, de hecho la "persona", desaparece. Así, para que las cualias aparezcan y desaparezcan, no basta considerar tan sólo la actividad eléctrica neuronal, sino que deben tenerse en cuenta los rangos particulares de frecuencia de la actividad cerebral global. En términos más sencillos, para evocar sentimientos es necesaria la activación de patrones eléctricos específicos, globales y locales de modo temporalmente coherente.

Geometría funcional de las cualias: PAF interiorizados

¿Cuál sería, entonces, la base neuronal de las cualias? Deseo abordar momentáneamente el tema de las cualias desde una perspectiva más teórica, comenzando con el punto de vista motor y

basándome en buena parte en lo aprendido en capítulos anteriores. En último término, la motricidad siempre es producto de las contracciones musculares, puesto que no hay otro modo de moverse. De inmediato se concluye que el contexto del sistema nervioso incluye, al final de la cadena, un efecior motor que transforma la actividad eléctrica de las neuronas motoras en contracciones musculares manifiestas. Por analogía, cabe preguntar cuál es el efector, el aparato de expresión última de la experiencia sensorial. Éste es, para mí, el problema más importante de la neurociencia contemporánea. Fisiológicamente hablando, no sabemos cuáles sean, o cómo funcionen, los efectores de la experiencia sensorial. Sin embargo, conocemos su ámbito de operación. Sabemos, por ejemplo, que se requiere una actividad eléctrica neuronal de un tipo particular, en determinados sitios del sistema nervioso central, mientras que en otros debe silenciarse. Visto así, concluimos que las bases neuronales de los efectores de las cualias son muy semejantes a las de los PAF motores, sólo que parecen ser PAF interiorizados. En cuanto a su expresión, los PAF motores permanecen silenciosos en el cerebro hasta ser liberados, expresándose externamente en un movimiento estereotipado. Por el contrario, los que denominare PAF sensoriales encuentran su expresión final internamente; esta expresión es lo que conocemos como experiencia subjetiva. Los PAF sensoriales están acompañados de experiencias subjetivas, bien sean producidas por la activación de las vías sensoriales debida a estímulos externos, bien por la estimulación experimental eléctrica (o química) en diversas áreas del cerebro, o bien por acciones iniciadas en el interior, como en los sueños. Es claro que cuando se estimula experimentalmente el cerebro, con corriente aplicada directamente, se producen pequeños fragmentos de sensación y no eventos sensoriales completos como los que se generan cuando la activación cerebral es normal, fisiológica. Esto no es sorprendente. Basta con comparar la activación fisiológica normal del cerebro y la intrincada complejidad de su organización eléctrica con la estimulación eléctrica exógena, y en el mejor de los casos resulta extraordinariamente burda y limitada, tanto en su elaboración como en su alcance y complejidad.

Experimentalmente se demuestra que la estimulación eléctrica del cerebro produce sensaciones, y que al anestesiar o destruir esas áreas o las vías que las activan, tales sensaciones desaparecen. Por ende, puede decirse que muy probablemente las cualias se relacionan con el tipo y la localización de la actividad eléctrica. En este punto existen unos pocos escenarios que podemos considerar. Muchos se inclinan por pensar que las cualias representarían eventos muy profundos de la función neurona!, relacionados con las estructuras mecánicas cuánticas de las neuronas, entre las que se incluyen los detalles de la organización de los mictotúbulos y microfilamentos. Por supuesto, ello abre en la neurociencia un área nueva y hasta el momento inexplorada. Yo no proseguiré por allí, porque sinceramente dudo que se compruebe con un análisis serio. La razón para descartarlo es que los elementos neuronales subyacentes a la activación sensorial parecen ser muy semejantes a los que sirven de base a la actividad motora. Al parecer, las cualias se relacionan no sólo con neuronas particulares en sí sino, más aún, con la geometría dinámica de los patrones de actividad eléctrica que las neuronas son capaces de producir.

Para mí, la razón evolutiva de las cualias es abordable. Representan la línea de base del funcionamiento cerebral, ya que las sensaciones de por sí son eventos geométricos desencadenados eléctricamente, y hasta aquí llega el nivel de análisis posible en este momento. Pero si tal estado geométrico y funcional es la sensación en sí, surge inmediatamente un serio problema filosófico. Según esta definición, ¿no serían las cualias simplemente otro ejemplo de aquello que "todavía está por comprenderse"? O, desde el punto de vista cualitativo, ¿podrían quizás ser algo que es radicalmente diferente, algo que transciende al sustrato neurológico de las neuronas y de su actividad eléctrica, tras lo cual intentamos esconder las cualias? Por el contrario, creo que la esencia de la sensación es justamente el conjunto de patrones de actividad eléctrica de las neuronas y de sus contrapartes moleculares.

"El problema difícil": ¿Será cierto que la ciencia nunca entenderá los sentimientos?

Así, en cuanto a la base neurobiológica de las cualias, podríamos limitarnos a describir los eventos funcionales de ciertos circuitos neuronales y que se relacionan con la activación de algunas neuronas y el silencio de otras. Por trillada que parezca, esta descripción es la única que permite abordar científicamente el problema. Falla todavía mucho por conocer sobre la intrincada función del sistema nervioso, antes de comenzar a comprender la entraña de los sentimientos. Sin embargo, ¿qué puede decirse hoy en día de las cualias?

Para efectos prácticos, la cuestión de las cualias o de los sentimientos es la cuestión de la experiencia consciente. Continuamente se discute si algún día llegaremos a comprender en términos científicos un fenómeno tan escurridizo, e incluso se debate si algún día llegaremos a una explicación hipotética, basada en procesos físico-neurales, que resulte satisfactoria y completa (ver Chalmers, 1995, 1997; Shear, 1997, para una discusión sobre diversos aspectos de este problema). Pese a que en el momento no disponemos de respuesta a estas preguntas, al menos podemos contextualizarlas de una manera útil.

David Chalmers, uno de los autores contemporáneos más reconocidos en este debate, ubica el problema anotando en primer lugar que la conciencia es un término ambiguo, empleado para denotar un conjunto de fenómenos diversos que incluyen lo que él denomina los "problemas blandos" así como los "problemas duros" de la experiencia consciente en sí.

Los problemas fáciles o "blandos" de la conciencia son los que parecen susceptibles de estudio directo con los métodos corrientes de la ciencia cognoscitiva, según los cuales un fenómeno se explica en lo referente a sus mecanismos de cómputos o neurales. Los problemas difíciles o "duros" son los que parecen refractarios a tales métodos. Los problemas fáciles de la conciencia incluyen aquellos que explican los siguientes fenómenos:

- La capacidad de discriminar, categorizar y reaccionar a estímulos ambientales;
- La integración de la información mediante un sistema cognoscitivo;
- La capacidad de informar acerca de los estados mentales;
- La capacidad del sistema de tener acceso a sus propios estados internos;
- El foco de atención;
- El control deliberado del comportamiento; y
- La diferencia entre la vigilia y el sueño. (Chalmers, 1995.)

Y añade:

Una vez explicada la operación de las funciones relevantes de estos fenómenos, los habremos explicado a satisfacción. Por el contrario, en el "problema duro" no se trata de cómo se efectúan las funciones. Por cada función explicada queda sin responder una pregunta nada trivial: ¿por qué razón la ejecución de esta función se asocia con la experiencia consciente? Lo que es una explicación funcional satisfactoria para los problemas blandos, no lo es automáticamente para los problemas duros. (Chalmers, 1997.)

Chalmers agrupa todos los fenómenos "blandos" asociados con la conciencia bajo el término general de "darse cuenta de algo" (fenómenos funcionales que se pueden informar), y posteriormente plantea una relación indisoluble entre "e! darse cuenta de" y la experiencia, casi como causa y efecto:

En primer lugar, cuando uno se da cuenta de algo, se entiende que se trata del contenido de lo que es directamente accesible y potencialmente comunicable, al menos en sistemas mediados por un lenguaje.

Aunque la experiencia de darse cuenta de algo es una noción puramente funcional, se relaciona íntimamente con la experiencia consciente. En general, allí donde encontramos conciencia encontramos que el organismo se da cuenta de algo. Siempre que haya experiencia

consciente, el sistema cognoscitivo generará una información correspondiente que sirve para el control comportamental y que es susceptible de informe verbal. A su vez, parece que siempre que la información tenga acceso al informe verbal y al control global habrá una experiencia consciente correspondiente. Así pues, hay correspondencia directa entre estar consciente y darse cuenta de algo. (Chalmers, 1995.)

Volvemos pues al problema esencial, ya que, según Chalmers, el mapeo de el darse cuenta de algo, radica en la experiencia consciente generada por los mecanismos físicos del cerebro:

En general toda información que se experimente conscientemente se representará cognoscitivamente... Este principio refleja algo fundamental, pues aunque los procesos cognoscitivos no conlleven lo que conceptualmente llamaríamos datos de la experiencia consciente, ni la conciencia ni la cognición flotan libremente sin relación entre si, sino que están íntimamente cohesionadas. (Chalmers, 1995.)

Aunque la posibilidades planteadas por Chalmers podrían ser válidas, pueden además ser secundarias al origen fundamental de las cualias, ligadas a los mecanismos físicos presentes en los organismos vivos y mas antiguas que los procesos cognoscitivos de los cerebros complejos. Cabe concebir, por tanto, que se trate de una relación de causa-efecto opuesta a lo esperado, por lo menos conceptualmente hablando; pienso que podemos exponer aquí una hipótesis plausible que explica la naturaleza misma de las cualias. Por ser una perspectiva un tanto inusual, paso a preparar el terreno.

Desde hace tiempo se sabe que células simples tienen propiedades de irritabilidad (la capacidad de responder comportamentalmente a estímulos), alejándose o acercándose a objetos o a otras células. Esta irritabilidad se ilustra con los movimientos para buscar alimento, o con evitar condiciones nocivas o amenazantes. No olvidemos que las células aisladas tienen propiedades muy antiguas, que se relacionan con la intencionalidad y, por ende, con lo que podríamos considerar como una función sensorial muy primitiva. Si pensamos que las cualias representan una especialización de este sensorio primitivo, sería un paso razonable, dado desde allí, para llegar al fenómeno de los "sentimientos corporativos" de los organismos superiores, en el ámbito multicelular. Si nos podemos acomodar a esta noción, comprenderemos que las cualias deben surgir fundamentalmente de propiedades de las células aisladas (figura 10.2), amplificadas gracias a la organización de circuitos especializados en funciones sensoriales.

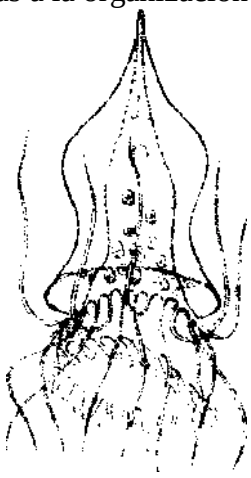


Figura 10.2

Dibujo del organismo unicelular Codonella Companella que ilustra el alto grado de especialización estructural posible en una sola célula. (De Villee-Dethier. 1971. figura 3-2. p. 33.)

Lo anterior significa que sólo los circuitos con suficientes células sensoriales organizadas en una arquitectura particular podrán ser la base de dicha función. Esto se ilustra en las propiedades contráctiles de las células musculares, que caracterizan a cada una de ellas, y que no es más que la especialización de las interacciones filamentosas presentes en cada una de las células, una especialización prominente en razón de su arquitectura. En los músculos, las moléculas de acrina y miosina están organizadas en paralelo entre sí, lo que permite que la red de filamentos se deslice. Como además están andadas al sistema endoesquelérico, la fuerza resultante de la interacción entre los filamentos se suma vectorialmente y produce la contracción celular (Huxley, 1980). Si la fuerza generada por la contracción simultánea de muchas células se adiciona y converge en un punto común (un tendón), la fuerza macroscópica resultante será capaz de producir un movimiento. Tenemos pues la evolución de un motor colectivo. Probablemente en las células sensoriales también suceda algo similar. Como veremos más adelante, sus propiedades aditivas ya se han estudiado. Qué es lo que se suma (la propiedad primitiva, tipo cualia, de una sola célula) es lo que debe ser entendido, pero el problema así enfrentado parece mas abordable. Veremos que no estamos buscando un fantasma.

El tema de las cualias como propiedad de la célula aislada

¿Qué puede decirse, entonces, del papel que desempeñan las células aisladas en la generación de las cualias? La manera mas sencilla de abordar el lema es tomar como referencia otras propiedades celulares que se relacionen, así sea remotamente, con el presente problema. ¿En qué otros sistemas una señal eléctrica desencadena una acción celular coherente? Vimos que quizás la mejor analogía sea la contracción muscular.

Las siguientes propiedades son comunes a la contracción muscular y a las cualias:

1. Ambas se desencadenan por la activación eléctrica de las células.

2. En ambas, el evento celular de interés es disociable del evento eléctrico que lo desencadena, siendo éste posterior a la activación eléctrica.

3. El "evento colectivo" de la contracción muscular, o de la cualia, tiene propiedades aditivas relacionadas con el número de elementos activados y con la frecuencia de la activación.

• En el músculo, el producto de la activación celular —la fuerza— es la suma (lineal) de la tensión de cada célula sobre un tendón común (una propiedad geométrica) en un momento determinado.

• En las cualias, el producto de la activación celular —la "sensación"— es la suma (logarítmica) de cada activación celular sobre un evento coherente común (una propiedad geométrica) en un momento determinado.

4. Los fármacos pueden afectar la contracción muscular y las cualias.

• La modificación de la actividad eléctrica por bloqueo de la conductancia del sodio (v. gr., con TTX) impide tanto la contracción muscular como las cualias.

• Ciertos fármacos pueden modular la contracción muscular al actuar sobre los receptores de membrana que modifican determinados eventos moleculares intracelulares (glibenclamida) (Light et al., 1994). Igualmente, ciertos fármacos modulan las cualias porque actúan sobre los receptores de membrana que modifican algunos eventos moleculares intracelulares (drogas psicotrópicas como la marihuana).

A continuación se enuncian las propiedades que son diferentes en la contracción muscular y las cualias:

1. Los productos finales de la contracción muscular y de las cualias son muy diferentes.

• La fuerza es un concepto físico antiguo, relacionado fundamentalmente con el rápido intercambio de una fuerza virtual que transporta partículas entre moléculas en el interior de una

célula muscular (la teoría de filamento deslizante) .

• La noción de cualias (sensaciones subjetivas) es muy antigua en la "filosofía natural" y no se relaciona con nada de lo que sucede en la célula, según nuestros conocimientos actuales,

2. Las células musculares se reconocen fácilmente por su estructura interna muy específica. Las neuronas que soportan las cualias no difieren de las que no se relacionan con ellas. Ni siquiera se sabe si existen diferencias entre ellas.

3. Las células musculares pueden contraerse en condiciones in vitro. No es posible demostrar que las neuronas sensoriales generen cualias en condiciones diferentes de su ubicación en animales intactos. Por tanto, sólo sabremos que la estimulación eléctrica neuronal generó una sensación, si un humano la informa como respuesta comportamental: "Sí. sentí esto".

Nótese que las semejanzas exceden a las diferencias y que las diferencias se agrupan bajo una sola categoría, a saber, ausencia de conocimiento específico.

¿Pueden cuantificarse las cualias?

Si el cerebro intenta continuamente reducir la sobrecarga funcional impuesta por el control motor, es difícil creer que no haga lo mismo con los sistemas sensoriales. Entonces, ¿cuál es la simplificación que da origen a las cualias? Como no es posible atender permanentemente todas las entradas sensoriales a la vez, las cualias serían estructuras funcionales a las cuales el sistema tálamo-cortical pueda prestarle foco y/o atención y/o significado, momento a momento.

¿Es posible describir el funcionamiento de la percepción en alguna modalidad sensorial? ¿Existe algún patrón subyacente que ,nos permita una aproximación acerca de la arquitectura funcional que sirve de base a las cualias? En otras palabras, ¿existe algún parámetro que podamos medir y que aclare la naturaleza de la arquitectura funcional subyacente a las cualias? Existe, en efecto-Todas las cualias pueden medirse según la ley matemática de Weber-Fechner (Cope, 1976), que estipula la relación entre la intensidad de la actividad sensorial y la percepción:

$s = k\ln A/A_0$

En donde "s" es la experiencia sensorial, "k" es una constante de proporcionalidad, "In" es el logaritmo natural, "A" es la activación sensoria! y "A" es el nivel de activación en el cual no hay experiencia sensorial, es decir, en el cual el estímulo es apenas inferior al umbral de percepción. Puede observarse que a medida que aumenta la amplitud de "A" la experiencia sensorial aumenta en relación constante en una progresión geométrica basada en el valor de e, 2,17, que es la base de los logaritmos naturales.

Tal progresión matemática divide la experiencia sensorial en eventos discretos percibidos, si hablamos en lo referente a los tonos musicales. Los humanos detectamos diferencias de tono, en pasos tan pequeños como de unos milésimos del porcentaje de cambio de la frecuencia del sonido. Si observamos la notación musical, nos deja ver que las nocas correspondientes a determinados incrementos (o decrementos) en la frecuencia del sonido tienen un determinado cambio proporcional a partir de la frecuencia original o "intervalo". Por ejemplo, una octava hacia arriba corresponde al doble de la frecuencia del sonido original, en la siguiente octava la frecuencia aumenta cuatro veces, en la tercera aumenta ocho veces y así sucesivamente, independientemente de la nota escogida en un comienzo. Así mismo el pentagrama, las cinco líneas paralelas horizontales de la notación musical adoptada en Occidente desde cuando Guido de Arezzo la introdujera hace mil años, denota el logaritmo de la frecuencia del sonido expresado verticalmente y el tiempo indicado de izquierda a derecha (figura 10.3). De hecho, los etnomusicólogos saben que la estructura básica de siete notas del sistema occidental no es única.

Las notas del sistema musical hindú: sa, ri, ga, ma, pa, dha y ni son idénticas al do, re, mi, fa, sol, la, si del sistema occidental. Puede que no sea mera coincidencia que también reconozcamos siete colores; la estructura de las bandas de siete colores del arco iris es una constante de nuestras cualias. El orden siempre es el mismo; lo que cambia es la anchura. Lo anterior sugiere que el número siete desempeña un papel muy importante y generalizado de demarcación de la experiencia sensorial; la tesis del "siete más menos dos", el número mágico tan elegantemente descrito por George Millar, apoya lo anterior.

En cuanto a esta geometría, pienso que para cualquier experiencia sensorial la estructura básica de las cualias probablemente consiste en un punto central, con cierto número de niveles superiores e inferiores expresados como proporciones del valor central (dos a cuatro niveles, en sistemas basados respectivamente en cinco a nueve puntos primarios). Por punto central me refiero al nivel en el cual la mayoría de los receptores de una modalidad sensorial emiten su patrón o tasa de disparos más frecuente. Las tasas de disparos inferiores o superiores a este punto central desencadenarían una modulación retroalimentante. El sistema de la temperatura corporal, por ejemplo, opera en torno de un punto prefijado en 36,5° Celsius. Si este valor aumenta o disminuye, se desencadena una reacción que devolverá el sistema a su punto de fijación natural. Así mismo, el punto central de actividad neuronal del sistema vestibular humano que maneja el sentido del equilibrio se basa en la posición erecta, vertical. Las neuronas vestibulares que disparan más frecuentemente lo hacen aun cuando el movimiento del cuerpo sea mínimo, lo cual subraya la importancia de la posición vertical como punto central en torno del cual opera el equilibrio.

Kinderszenen
Scenes of Childhood Scénes d` Enfants
Bobert Schumann, Op. 15
Von fremden Ländern und Menschen
From foreign Lanas and People Hommes et pays nouveaux

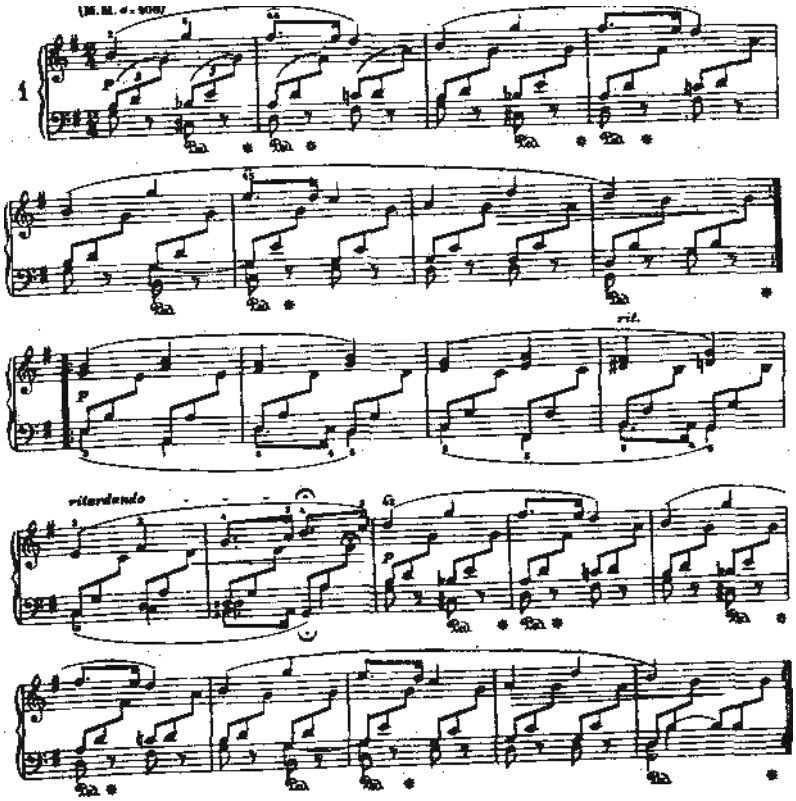


Figura 10.3

Notación musical que ilustra el sistema occidental heptatónico. Como se muestra en esta famosa composición de piano de Robert Schumann, la altura de cada nota se especifica por su posición en la clave de sol (arriba} o en la clave de fa (abajo).

Con respecto del origen de tal geometría funcional, vate la pena señalar que el crecimiento natural en condiciones normales se da en una base logarítmica e, como lo describiera John Napier en 1614. Esta constante universal, la solución de lnx=1, regula todas las formas de crecimiento (ver Thompson, Sobre el crecimiento y la forma) y se evidencia maravillosamente en la curvatura de las conchas del molusco Nautilus, ejemplo de la hermosa y ubicua estructura geométrica de la naturaleza. No sería de extrañar que las cualias deriven de arquitecturas eléctricas incorporadas a circuitos neuronales que sean capaces de generar tal orden logarítmico. Si las sensaciones obedecen a la geometría descrita por la ley de Weber-Fechner, muy probablemente los patrones eléctricos neuronales que representan las cualias también operen en una base geométrica, logarítmicamente similar a ésta.

¿Para qué sirven las cualias?

Dado el conocimiento actual, parece que de momento no nos es posible llegar a comprender mejor las cualias. Quienes niegan que las cualias se reducen a la actividad eléctrica y a la geometría de los circuitos neuronales, tal vez lo hagan por no haber comprendido las geometrías funcionales; las cualias no son eventos misteriosos suspendidos en "estados intermedios" que operan el milagro de transformar la actividad eléctrica en "sentimientos". Después de todo, recordemos que las cualias san solubles en anestésico local. En este caso, el fantasma de la máquina respondería a la cirugía, o incluso a un golpe en la cabeza. ¿Desde cuándo, entonces, son las propiedades trascendentales tan frágiles y cercanas a los procesos biológicos? La parsimonia y la seriedad científica indican claramente que d "puente", la "transformación misteriosa" de eventos electroquímicos en sensaciones, es un conjunto vacío. No existe. La actividad neuronal y la sensación son el mismo y único evento.

De hecho, si la célula aislada carece de los mínimos requisitos para generar las cualias, ¿cómo podrían grupos celulares generar algo que no pertenece a ninguno de sus componentes? En realidad, preguntar si las cualias son propiedades de células aisladas es análogo a preguntar si el movimiento es una propiedad de la célula aislada. Ya se dijo que el movimiento de los miembros, por ejemplo, se produce por la sumatoria de las propiedades contráctiles de muchas células musculares, ya que una sola célula muscular no puede hacer que todo el miembro se mueva. Para continuar con el mismo argumento, se deduce que las células nerviosas necesariamente estarán en capacidad de producir "protocualias". La sensación organizada requiere que muchas neuronas se activen en un patrón determinado, es decir implica la generación de una arquitectura neuronal, que permita cualias macroscópicas, así como el aparato músculoesquelético requiere una arquitectura capaz de producir el movimiento.

Volviendo a los PAF sensoriales, a través de toda la historia de la neurociencia aflora el concepto de "líneas marcadas", que teóricamente ayuda a eliminar definitivamente el "fantasma en la máquina". Este concepto supone que las vías de transmisión, en cada uno de los sentidos, codifican las propiedades del mundo acerca del cual informan en patrones de disparo muy específicos, y que cada línea o vía sólo lleva información de una modalidad dada. Estos patrones específicos son literalmente los mensajes del mundo externo en cada modalidad sensorial.

Es fácil entender que para percibir sonidos se requieren receptores que conviertan las ondas sonoras en energía neural. En efecto, éstos son las "células ciliadas" del aparato auditivo, que responden a sonidos de alta frecuencia, con una frecuencia aira de disparos, y con una menor ante sonidos de baja frecuencia. Ante la presión leve en la piel, los corpúsculos de Pacini,

receptores cutáneos sensibles a la compresión mecánica, transmiten por su "línea marcada" mensajes en pulsos de baja frecuencia, y ante la presión más intensa, disparan a frecuencias respectivamente más altas. Es así cómo el mensaje inicial transportado por determinada vía sensorial "marca" fielmente su contraparte externa. La propiedad de codificar frecuencias y el hecho de que cada vía sensorial sólo transmita información de su modalidad sensorial específica originaron el concepto de "líneas marcadas".

Pero sigamos más de cerca a una de estas líneas marcadas, hasta el sistema nervioso central. El parrón de disparos de alta frecuencia que el aparato auditivo emite en respuesta a sonidos de alta frecuencia varía, pues al llegar a su destino final (a las neuronas corticales auditivas) la actividad de esta línea que disparaba a altas frecuencias ahora se traduce en actividad de baja frecuencia. Esto nos indica algo muy importante: lo que se transmite no es el código o el mensaje que llega del mundo externo, sino que es el elemento neuronal que responde a los mensajes del exterior lo que constituye, en sí mismo, el mensaje. Es la sensación que emana de un PAF activado internamente, por lo que puede decirse que la línea marcada transporta la frecuencia, que de hecho es la misma que activó el disparo.

¿Es posible llegar a definir una arquitectura funcional de las cualias? Prosigamos con el concepto de efectores de la sensación, como lo son los PAF sensoriales. Por los capítulos 2 y 7 sabemos que los PAF motores representan la tendencia que tiene la organización funcional natural del sistema nervioso central a ser máximamente eficiente en sus cómputos. Al activarse o liberarse estos módulos de "prenda y active", se convocan automáticamente diversos grupos musculares y las sinergias requeridas para efectuar movimientos estereotipados, bien sean sencillos o complejos. Se recordará que la eficiencia computacional se debe a la automaticidad prefijada de estos módulos funcionales, ya que no es necesario que el cerebro, en cuanto a los circuitos neuronales se refiere, "invente la rueda" cada vez que las circunstancias requieran cierta rutina de movimiento, lo cual permite al sistema nervioso central ocuparse de otras cosas. Los efectores de los PAF motores son las neuronas motoras y los músculos, cuyas contracciones son manejadas por esas neuronas. Es decir, la geometría funcional interna de los ganglios basales se traduce en expresión gracias a la geometría funcional, que determina según el contexto momentáneo, interno o externo, cómo puede y necesita moverse el cuerpo.

¿Pueden considerarse del mismo modo las cualias o las sensaciones o experiencia sensoriales? Claro que sí, y la clave se debe al impulso innato del cerebro de reducir la sobrecarga. Ya mencioné que las señales auditivas de alta frecuencia se traducen en actividad de baja frecuencia en cuanto más internamente penetran las vías sensoriales en el sistema nervioso central. Esto concuerda con lo dicho sobre la economía en la transmisión. En lugar de generar elementos complejos a partir de otros más simples, cada elemento conlleva su propio significado y el todo es ensamblado por la presencia pre-existente, o la ausencia, de una actividad significativa.

Este punto concuerda con lo que ya sabemos acerca de la organización funcional de los sistemas sensoriales, descrita en el capítulo 5. Las propiedades geométricas del mundo externo se traducen a una geometría del espacio funcional interno, y la naturaleza misma de esta transformación hace que la realidad continuamente se simplifique. Así debe ser, pues es la única manera como el cerebro puede mantenerse al tanto de la realidad. Debe siempre simplificar.

La necesidad de cualias

¿Por qué es tan importante plantear el problema de las cualias en los animales?

La mayoría de la gente no parece convencida de la necesidad de las cualias en ningún animal. Uno podría, suponemos, ejecutar exactamente las mismas acciones sin cualias o sin sentimientos. ¡La vida sería exactamente igual sin ellas! Sin cualias, los gatos podrían hacer todo lo que hacen, como autómatas: no hay ninguna ventaja adicional, no hay razón para las cualias. ¿Deberíamos entonces negar su existencia? Por el contrario, desde el punto de vista del

funcionamiento del cerebro, para mí, las cualias deben ser la suma final, el aspecto de nuestro yo que se refiere a nuestra "propia existencia". ¡Es un truco fantástico! Las cualias son propiedades de la mente de monumental importancia, por lo que sin ellas seria imposible operar. Las cualias facilitan la operación del sistema nervioso, suministrando marcos de referencia bien definidos y patrones de simplificación que implementan e incrementan la velocidad de las decisiones, y permiten que tales decisiones retornen (al sistema) y se conviertan en parte del panorama de la percepción. No sólo el lector sintió el pinchazo de una espina y se movió, sino que ahora se sensibilizo a todas las espinas — puede que las evite o que las domestique y las convierta en armas. Así, las cualias se tornan en instrumentos de suma importancia para la integración perceptual, que es el depósito del evento unificador.

En el capítulo 5, al examinar la evolución del ojo, vimos que la naturaleza genera muy complejas arquitecturas funcionales. Junto con el ojo, el corazón y otros, los PAF e incluso el lenguaje pueden considerarse como órganos cuyas capacidades y tareas son altamente especializadas. Pienso que podemos y debemos llegar a comprender tas cualias en lo relacionado con los órganos maestros que permiten que los sentidos individuales operen y se entremezclen unificadamente. Las cualias emiten juicios simplificado res momentáneos sobre esta actividad de conjunto, permitiendo que estos mismos juicios retornen al sistema para utilizarse según las necesidades predictivas del organismo (el "sí mismo"). Representan los juicios o evaluaciones efectuados a nivel de los circuitos sensoriales que transportan la información, o sea las sensaciones

Kiki Smith. Lengua y Mano, 1985. Yeso pintado, unidad de lengua. 14 x 8.9 x 7.6 cm; unidad de mano, 14x 7.7x8.9 cm. Fotografía de Ellen Page WiIson. Cortesía de Pace Wildenstein.

Y estas sensaciones, el producto integral de la activación de los PAF internos sensoriales, representan los vectores predíctivos cíclicos importantes, que retoman al paisaje interno del "si mismo". Son el "fantasma de la máquina" y representan ese importantísimo espacio entre la llegada y la salida, pues no siendo ni una ni otra, sin embargo, son producto de la una y el impulso de la otra. Finalmente, son estructuras funcionales, simplificadas por las propiedades intrínsecas de los circuitos neuronales del cerebro.

11

EL LENGUAJE COMO HIJO DEL PENSAMIENTO ABSTRACTO

Los comienzos de la abstracción

Comencemos poniéndonos de acuerdo sobre algunas definiciones concernientes a la abstracción o al pensamiento abstracto. En general la abstracción se refiere a algo que sólo existe en la mente: una idea, un concepto, una representación mental de algo, que puede (o no) existir en el mundo externo. La abstracción, o el conjunto de procesos neuronales que la originan, es un principio fundamental de la función del sistema nervioso. La naturaleza de estos procesos emana de los patrones filogenéticos del "cableado", adquirido por el sistema nervioso a lo largo de la evolución. Es muy probable, por tanto, que el abstraer sea muy antiguo y que su origen se remonte a sistemas nerviosos primitivos; esta perspectiva emerge de considerar que el cerebro está encaminado hacia el movimiento predictivo. Para contextualizar un movimiento en su entorno integral, en primer lugar el animal tendrá que generar algún tipo de "imagen" interna o descripción global de "sí mismo". Posteriormente esa imagen servirá de base a la estrategia alrededor de la cual se organizará la táctica de lo que el animal hará.

A primera vista, la generación de una transformación interna voluntaria sensomotora (ver capítulo 7) no tiene una correspondencia directa con la obvia conectividad neuronal requerida para tal transformación, por ejemplo, un golpe en los dedos del pie con una flexión de la pierna. El "cableado" más reciente representa, más que un mero reflejo segmentado, una función global. Ejemplo de lo anterior es el caminar coordinado de un animal elongado (multisegmentado), que no es solo el paso producido por un reflejo generado en un solo segmento.

Por "animal elongado" me refiero a cualquier criatura encefalizada, con una cabeza y una cola (o pies), con una columna o cadena de tejido nervioso que atraviesa el cuerpo en sentido longitudinal. Esta descripción abarca un amplio rango, desde las criaturas más bajas de la escala con una notocorda muy primitiva, hasta aquéllos con una medula espinal muy sofisticada. Que el sistema nervioso se haya organizado a través de la evolución, de una manera segmentada, se deriva probablemente de la necesidad neurobiológica de optimizar la relación de la superficie corporal con el volumen, con lo cual se minimiza la distancia a la cual debe viajar una señal nerviosa desde o hacia el mundo externo. Los animales elongados básicamente están organizados como "pila de monedas" dispuestas horizontalmente, en las cuales el contenido neural de cada moneda está dirigido hacia el servicio de ese segmento, y para muy poco más. Con el fin de hacer de estos segmentos un animal funcional, debe existir una porción del sistema nervioso que no sea únicamente segmentaria. Esta parte del sistema nervioso puede unir los diversos segmentos en un codo, que antes no existía. Como dijimos previamente, podemos considerar este hecho como el comienzo de una función abstracta, ya que ésta parte del sistema nervioso no está relacionada directamente con la conectividad nerviosa a ningún nivel segmentario en particular. El sistema nervioso hace abstracción del hecho de que el animal está Reconstituido por una serie de segmentos unidos, lo cual nos lleva inmediatamente a la conclusión de que el proceso de integración intersegmentaria es una abstracción y que representa el inicio de ésta como proceso biológico seleccionado naturalmente. Que ésta sea la dirección evolutiva desarrollada por la naturaleza se basa en la observación de que el sistema nervioso central se desarrolló al afrente de la medula espinal, polarizando así la encefalización. Vemos que aquí sucede algo importante: que en un animal muy desarrollado neurológicamente surge el hecho de que éste puede tener, una representación interna de si mismo, no sólo como una unión de partes, sino como una entidad única. Es aquí, en este metaevento germinal, donde la abstracción comienza y el "sí mismo" aparece.

¿Cómo se relaciona este hecho con la predicción? Más allá de la descripción del animal en sí y de la descripción de los impulsos que le llegan, los circuitos intrínsecos del sistema

nervioso son capaces de generar una representación promotora de lo que está sucediendo afuera. A partir de la presencia autorreferencial de esta imagen motora, el animal es capaz de decidir lo que debe hacer. El animal es capaz de "predecir": correr, pelear, conseguir comida o lo que sea. Funcionalmente hablando, el animal es el circuito que representa sus atributos motores. Este evento central es una entidad abstracta.

De gran importancia es lo que ocurre entre el estimulo que produce el movimiento y el PAF motor liberado. El origen del estímulo desencadenante puede ser externo ("¡una araña se me está " subiendo por entre los pantalones!") o interno ("¡dejé la estufa encendida en casa!"). En ambos casos, si se les otorga un significado interno apropiado (que obedece al "estatus" momentáneo, o al contexto del sistema cíclico tálamo-cortical), se amplifican hacia "Un estado emocional. Ya vimos que el sistema nervioso se encuentra "cableado" de tal manera que sólo libera PAF basados en los estados emocionales que los preceden. ASÍ, tales eventos internos, las emociones, por definición constituyen estados premotores.

Volveremos más adelante a este tema. Las emociones o estados emocionales son fenómenos que no existen en el mundo externo; son absolutamente internos y, de no ser por la motricidad, permanecerían completamente ocultos a observadores externos. Sólo por la expresión del PAF liberado, podemos inferir cuál es la emoción que lo generó. El perro gruñe y me muestra los dientes; es probable que no esté muy contento de verme. Otra cosa es cómo llegué a saberlo, o a deducirlo, lo que constituye otro tema que discutiremos en breve. De momento, el punto es que las emociones, por ser eventos puramente internos, son simplemente estados inventados por el sistema nervioso central y, como tales, son claramente abstracciones. Es Justo decir que, del mismo modo que las emociones, las abstracciones también son productos intrínsecos del funcionamiento del sistema nervioso central.

Intencionalidad

Volviendo a la predicción, es claro que ésta debe tener una meta o de lo contrario no tendría ningún marco de referencia; el movimiento sin objetivo no sólo es un gasto inútil, sino que puede ser muy peligroso. El destino o meta del movimiento debe definirse con precisión, o sea que lo intentado se haga en relación con las propiedades del objetivo. Con respecto de la abstracción, la intencionalidad es el detalle premotor del deseo de obtener algún resultado mediante un movimiento que exprese cierto estado emocional: escoger lo que haremos antes de hacerlo.

Consideremos lo siguiente: si nuestro cerebro es capaz de planear estrategias motoras que podemos implementar si lo deseamos, también es posible expresar nuestra intencionalidad como una manifestación motora de lo que está sucediendo en nuestra cabeza. Volvemos al párrafo anterior, para decir que la expresión externa de una actividad promotora precede y predice la activación de patrones motores específicos. Ejemplo de tal proceso sería gritar: "¡Corra!" ante un peligro, antes de comenzar a correr realmente, lo cual plantea un punto crucial acerca del lenguaje mismo. Pienso que la capacidad de vocalizar los múltiples aspectos de la intencionalidad se desarrolló primero como la capacidad de separar las propiedades de las cosas de las cosas en sí mismas. Con el tiempo, esta abstracción engendraría algo así como un catálogo mental, un alfabeto que nos permitiría generar dentro de nosotros imágenes que serían adiciones sucesivas, por la re-entrada de los eventos fundamentales, convirtiéndose así en el comienzo del lenguaje. Llegamos aquí a nuestro primer corolario: incluso antes de que el lenguaje estuviera suficientemente bien estructurado como para permitir la comunicación, su génesis requeriría que el sistema nervioso tuviera la capacidad fundamental de crear una serie de imágenes premotoras, necesarias para abstraer las propiedades de las cosas, a partir de las cosas mismas. Es decir, requeriría una imaginería premotora para hacer abstracción de universales.

Así, debemos tener en cuenta dos aspectos muy importantes respecto de la evolución del lenguaje. Primero, que el pensamiento abstracto evolucionó antes que el lenguaje y, segundo, que los eventos promotores que conducen a la expresión del lenguaje son exactamente los

mismos que los que preceden a cualquier movimiento que se ejecute con un propósito definido. Como estos dos puntos son prácticamente idénticos, se infiere que el lenguaje es un elemento de una categoría de funciones mucho más amplia y general.

Prosodia: primeras manifestaciones de un lenguaje interno

Indaguemos acerca de los posibles orígenes del lenguaje y de la revolución de este indispensable instrumento. De modo similar a lo que ocurrió en la evolución para el desarrollo del ojo, fue difícil encontrar una perspectiva clara de los orígenes evolutivos del lenguaje (ver discusiones y conceptos en MacNeilage, 1994, 1998; Verhaege, 1995; Gordon, 1996; Ujhelyi, 1996; Aboitiz y García, 1997a, b; Honda y Kusakawa, 1997; Ganger y Stromswold, 1998; Gannon et al, 1998; Doupe y Kuhl, 1999; Nowak y Krakauer, 1999). Como en los ejemplos anteriores, los pasos previos a la emergencia de un órgano especializado no necesariamente funcionan o se asemejan a lo que son en la actualidad. Por lo que conocemos de la evolución de las vidas que nos permitieron tener ojos, sería de esperarse que los ancestros del lenguaje tuvieran una vía genealógica insospechada.

Antes de proseguir, hagamos algunas definiciones aclaratorias. ¿Qué es lo que en realidad encendemos por "lenguaje"? Lo primero que se nos viene a la mente es el lenguaje humano con su gran variedad de formas escritas y habladas, así como también que las lenguas distintas de la nuestra son a la vez fascinantes y misteriosas. Si el lector, como muchos oíros, piensa que el lenguaje es exclusividad nuestra, o que fuimos los humanos quienes lo inventamos, entonces debo manifestar mi completo desacuerdo, por razones muy simples; es obvio que el lenguaje existe en diversas especies muchísimo más antiguas que nosotros (el Homo sapiens), además de que es un rasgo tan generalizado en el reino animal, que no puede ser considerado seriamente como de exclusivo dominio del humano. Pese a que probablemente nuestro lenguaje sea el más rico y complejo, no somos ni los inventores ni los únicos poseedores del lenguaje.

Definamos el lenguaje como la metodología mediante la cual los animales se comunican entre sí. Como esta definición no aborda el problema de la intención de comunicar, se trata entonces de una categoría bastante amplia y genérica, que sólo se refiere a que existe algún nivel de comunicación. Hasta el momento hemos dicho que el lenguaje es una extensión lógica de las propiedades intrínsecas de abstracción del sistema nervioso central, o simplemente del pensamiento abstracto. Pero pienso que lo anterior es una subcategoría de lenguaje que yo llamaría "prosodia" biológica. La prosodia es una forma más generalizada de comportamiento motor, una gesticulación externa de un estado interno, la expresión externa de una abstracción que emana del interior y que significa

algo para otro animal. Entre nosotros, sonreír, reír, fruncir el ceño, alzar las cejas son formas de prosodia, pues significan un estado interno momentáneo que otra persona reconoce y comprende. Aunque no es hablada, la prosodia es lenguaje y es comunicación intencional. En ningún caso se limita a los humanos, ya que es muy generalizada en el reino animal y muy antigua evolutivamente. En su brillante texto sobre las expresiones faciales, Darwin estudió la prosodia de los animales en cuanto a los estados de ánimo y las caras y de cómo las caras y las posturas expresan estados internos momentáneos del animal, que son abstracciones internas, como lo son también las emociones y las intenciones. Así pues, un evento prosódico es una abstracción acoplada a una expresión motora de un animal, que transmite a otro cuál es su estado interno en ese momento.

Si la prosodia representa una subcategoría del lenguaje, ¿podríamos encontrar ejemplos de lenguaje sin prosodia? Hay lenguajes que son tan extraordinariamente específicos, que no por transmitir mensajes muy simples dejan de ser esenciales para la supervivencia de la especie. Un ejemplo, la emisión de feromonas y sus sistemas de recepción en la polilla, que operan a kilómetros, convirtiéndose en una clara comunicación a distancia. La feromona liberada por la hembra es reconocida específica y exclusivamente por el macho de la misma especie, siendo suficientemente efectiva como comunicación entre la pareja, como para que puedan aparearse en

nichos por demás superpoblados (Willis y Arbas, 1991; Hildebrand, 1995; Roelofs, 1995; Baker et al., 1998). Pero, pese a que este lenguaje es crítico para la supervivencia de la especie, no se relaciona con la expresión externa de abstracciones generadas internamente. No es pues prosodia, sino más bien un simple evento capaz de modificar conductas mediante la liberación y recepción de moléculas específicas.

Sin embargo, en la mayoría de casos, el lenguaje se limita a eventos prosódicos. Tales lenguajes se observan en muchos niveles de la evolución, en donde realizan muy diversas funciones. El lenguaje de las abejas fue uno los primeros lenguajes no humanos que se pudo descifrar y comprender; comunica órdenes simples, siendo básicamente una danza, un ritmo y una orientación efectuados en el espacio. Cada abeja ejecuta una danza especifica de su especie para informar acerca de la cantidad y localización del alimento con referencia a la colmena, de manera que todas las abejas de la colonia estén al tanto y contribuyan a procurarse la comida (von Frisch, 1994; Gould, 1976. 1990; Hammer y Menzel, 1995; Menzel y Muller, 1996; Waddington et al., sfz 1998). Este tipo de lenguaje también se ha estudiado en otros invertebrados y en vertebrados. Por definición, estas formas de comunicación siempre requieren un orden social que permita que el organismo receptor de la información la utilice con algún propósito.

Hay variaciones del lenguaje que informan de cosas muy ajenas al mero sustento para la familia. Por ejemplo, al ser atacados, la mayoría de los animales adoptan posiciones que el atacante identifica como claramente defensivas o previas a un contragolpe. Tal postura puede ser algo tan sencillo como el aumento de tamaño del pez globo, para parecer más formidable, o el frecuente comportamiento de mostrar los dientes y de gruñir de la mayoría de los vertebrados. Los animales con cuernos, como el rinoceronte o el búfalo, toman posiciones en las cuales los cuernos apuntan hacia el animal amenazante o atacante. Es cierto que el repertorio de todos estos lenguajes es muy limitado, pero esta forma de prosodia probablemente es el fundamento mismo de todos los tipos de comunicación intencional, inter e intraespecies.

En niveles superiores de la escala evolutiva, vemos emerger lenguajes cuya organización es más elaborada. Un excelente ejemplo es el lenguaje de los lobos, el cual, mediante la prosodia, permite que las manadas expresen conducías relativamente complejas y socialmente estructuradas, tanto de ataque como de defensa. En este caso las relaciones entre estos animales no son de simple prosodia, sino que representan el contexto (social) dentro del cual se utiliza este lenguaje prosódico.

Este tipo de prosodia es muy sofisticada en los Sobos y se expresa globalmente mediante múltiples variaciones, como la vocalización, el contacto de ojos, los gestos de la cabeza y toda la comunicación corporal. Por ejemplo, la dominancia (determinar cuál será el futuro macho alfa) se efectúa mediante la comunicación, no sólo del poderío físico, sino por el grado de sumisión que expresa la posición social de los machos subordinados, quienes se tenderán en los lomos, ofreciendo el cuello al macho alfa. Este tipo de lenguaje permite establecer una jerarquía social que es básica para las estrategias de conjunto de la manada. Sin embargo, durante la caza se generan otros factores, de tal manera que:

El liderazgo real no es muy aparente en la manada de lobos, puesto que cualquier animal puede iniciar el ataque. Sin embargo, hay un alto grado de cooperación para la caza y el cuidado de las crías. En manadas salvajes, la organización de la dominancia no se manifiesta muy explícitamente, pero en cautiverio en los zoológicos, cuando su principal ocupación de cazar se torna innecesaria por estar alimentados artificialmente, entonces pasarán largos períodos amenazándose entre sí e imponiendo la dominancia (Dewsbury y Rethlingshafer, 1973).

Pese a los riesgos de generalizar comportamientos observados en cautiverio a comportamientos en la naturaleza, el hecho es que la organización social de los lobos es jerárquica, por lo cual los eventos prosódicos o de lenguaje tendrán diferentes significados en los diversos estratos de la jerarquía. La prosodia que en la secuencia de ataque le indica al adulto

macho cuándo debe lanzarse, puede indicarle al cachorro simplemente la diferencia entre el ataque y la defensa. Lo importante aquí es que la jerarquía social en sí no se daría de no existir elementos comunes en todos los niveles. Vemos pues que el lenguaje se desarrolla en el contexto de un orden social particular, a manera de vínculo entre los animales, para formar una sola entidad funcional en beneficio de todos.

También en perros salvajes del África se observan comportamientos de caza muy interesantes. Con frecuencia atacan en pastizales altos, ya que es allí donde generalmente encuentran a los pequeños animales que son sus presas. Las puntas de las colas de estos perros son blancas. Erguidas en el aire, se mueven en vaivén, formando patrones que estimulan la visión periférica. De este modo, cada perro, sin tener que fijarse mucho a su alrededor, puede localizar las otras colas y recibe así un informe constantemente actualizado de la estructura de la manada, conforme se aleje o arrincone a la presa. No es descabellado considerar aquí la fascinante posibilidad de que la anatomía evolucionara para relacionarse con el lenguaje de la estrategia.

Estas propiedades prosódicas del conjunto de la especie canina dieron lugar a la relación tan particular del perro con el hombre, relación especialmente dará en situaciones en las que el perro y el hombre forman un equipo de trabajo, como en el pastoreo o la caza. En estos casos, el perro simplemente expresa propiedades (abstracción y prosodia) genéricamente determinadas, que tienen que ver con las relaciones jerárquicas ya conocidas — sólo que en este caso la jerarquía es con un animal diferente de otro perro.

Mímica: el origen del significado entre organismos

Parece inevitable concluir que el lenguaje probablemente evolucionó a partir de un

atributo prelingüística estrechamente relacionado con la prosodia y acentuado por ciertos sonidos o gestos particulares. Pero no olvidemos un elemento crucial del lenguaje. Si la prosodia es la expresión externa de un estado interno momentáneo, ¿cuál es su propósito si no es el de ser comprendida por otro animal? Una comunicación que no se base en un significado consensual (entre las partes) simplemente no es comunicación, por lo que la pregunta real será entonces: ¿cómo logró introducirse en la comunicación el aspecto del significado para la contraparte?

Me gustaría referirme a lo anterior como a la naturaleza "infecciosa" de la actividad cerebral. La risa es el ejemplo perfecto: es contagiosa entre la gente. Alguien comienza a reír, otro lo oye (y/o lo ve) y pronto es inevitable reír. En otras palabras, una vez generada la risa en un individuo, al ser percibida por otro crea un estado semejante en su mente. Es como si la abstracción misma fuera infecciosa — una propiedad intrínseca de los circuitos neuronales que parece salirse de sí misma. Si la risa es contagiosa, al igual que el bostezo, tal vez mostrar los dientes y gruñir también sean "infecciosos". Examinemos esto en detalle.

Consideremos los kukaburras, pájaros de Australia que se organizan colgando en grupos, salpicando de machones negros y blancos las ramas de unos cuantos árboles cercanos. En medio del silencio, se deja oír el sonido característico de uno de ellos, que a los humanos nos resulta idéntico a la risa humana distorsionada. Luego otro kukaburra comienza a "reír", imitando el sonido del primero, y en segundos toda la bandada se está "carcajeando". Lo mismo se observa en las luciérnagas: una luciérnaga macho se enciende, otras la siguen, ¡deslumbrando realmente a la hembra en lontananza!

¿Qué nos dice esta mímica acerca del lenguaje? Un sistema nervioso que accidentalmente adquiera la capacidad de reconocer sensorialmente PAF generados por otros, ofrecería grandes ventajas para animales que vivan en grupos. "De facto ", esta. propiedad hace de! grupo ¡anímales del mismo pelambre! Así, cuando los animales se imitan entre sí, inmediatamente tienden a formar una familia, porque es obvio que esto produce un sentido de familiaridad: ¡Hola, usted es de los nuestros!

Es cierto que a los parientes se les reconoce desde el comienzo de los tiempos, pero la mímica que se capta por los sentidos fomenta este reconocimiento mediante la repetición de los

PAF de los demás miembros del grupo (figura 11.1), ¿Qué puede decirse entonces del significado de la comunicación entre especies? Sé que el perro de marras que me gruñía, me indica a mí, o a otro perro, que estamos en problemas. ¿Cómo se sabe? ¿Cómo lo sé yo? Mejor aún, ¿cómo llegamos a saberlo? Retrocedamos en la evolución y , analicemos.

Figura 11.1
Pesca de hormigas aprendida por imitación. (Fotografía de T. Nishida, tomado de Whiten ét al., 1999,)

Un animal le muestra los dientes a otro, el cual no reconoce dicho PAF. Sin embargo, este PAF evoca a su vez un PAF de "entonces muestre sus dientes" o "corra". ¿Por qué? Porque todos los que no respondieron rápidamente al PAF de "me mostró los dientes", ¡murieron! Se convirtieron en merienda, por lo cual con el tiempo ¡se descartaron del reservorio genético! Pero los que permanecieron en cuanto a selección natural, transformaron este PAF de reconocimiento en un a priori intrínseco.

ASÍ pues, heredamos de la filogenia la capacidad de reconocer que ciertas cosas son peligrosas, por herencia, sin tener que memorizarlas ontogénicamente; por ejemplo, los peces saben desde el nacimiento que los colores muy vivos de otros peces son peligrosos. Sencillamente, es algo que ya saben. Esos peces de colores vivos que van allá son venenosos; ¡lo están anunciando! ¡Y esto forma parte del "cableado" de los peces, tanto como el hecho de tener colas! Si se quiere, lo anterior es el punto final evolutivo, pero en su origen está la mímica. Es obvio que el lenguaje no tendría mucho sentido si el receptor no comprendiera su significado. ¿Cómo ocurre la comprensión? Para que un animal comprenda el lenguaje, lo más fácil es que, de algún modo, el receptor asocie un evento motor producido por él mismo con la recepción del mismo evento efectuado por otro animal. Es decir, la expresión externa motora de la imagen sensomotora se compara con lo que el animal receptor realmente experimenta con sus sentidos: "El mono ve, el mono hace".

Aunque esto puede lograrse por aprendizaje, el mecanismo debe ser más poderoso que simplemente eso. Tendría que hacerse por el entendimiento (desde el punto de vista sensorial) de las consecuencias del comportamiento motor imitado. Esto es un poco complicado, pues hay un obstáculo por vencer.

Me explico. Supongamos que soy un caimán y que estoy mostrando los dientes. Esta situación es más complicada de lo que parece: Nunca me he visto a mí mismo mostrando los dientes. Sin embargo, puedo oír mi propio gruñido, de modo que cuando oigo gruñir a alguien lo

reconozco como aquello que hago cuando estoy de cierto humor. Si veo que el gruñido va unido frecuentemente con mostrar los dientes, rápidamente asociaré ambas cosas y así cuando otro caimán me muestra los dientes no hago caso omiso de él o miro hacia otro lado como si nada. Éste es el punto medular de la evolución. Llegar a conocer los universales tuvo que originarse en que en un comienzo no se conocía acerca de ellos; esto sólo es posible de dos maneras. O bien el sistema nervioso sabe de antemano lo que está haciendo, o no lo sabe, en cuyo caso será la selección natural la que determine la respuesta: cuando otro caimán me muestra los dientes, yo le respondo mostrándole los míos. La respuesta correcta, claro está, es la segunda alternativa, la selección natural. ¿Cómo lo sé? Recordemos que al vernos por primera vez en televisión o en cine, siempre nos sorprendemos de lo tontos que parecemos. Hay algo interno que no cuadra con la representación externa del mismo evento, de modo que para comprender cabalmente la situación, no basta la imagen sensomotora de la acción. Desde el punto de vista sensorial, debe haber una manera de entender las consecuencias de una conducta motora. Ésta es la mímica. Yo, como caimán, no me veo a mí mismo mostrando los dientes, pero sé que lo hago cuando estoy furioso o cuando estoy listo a atacar. Ése es mi estado emocional y ése es el PAF liberado por él. Posteriormente veo que ese animal de allí, caimán u otro, me muestra los dientes. ¿Asocio o no que dicho PAF es la expresión externa del mismo estado interno de cólera que conozco en mí mismo? Por fortuna lo hago — me va la vida en ello — pero el caso es que sólo así un animal reconocerá e identificará el estado momentáneo interno de otro animal. Esta comprensión se adquiere tratando de imitar el comportamiento motor de otro, actuando por mímica y a la larga por ensayo y error. Puede que yo tarde indefinidamente en entender que cierto gesto de otro animal significa peligro, ya que no puedo saberlo. Por otro lado, si he vivido suficiente tiempo cerca de otros caimanes, que sí lo saben, simplemente imitando lo que hacían cuando otro les mostraba los dientes y les gruñía, me habría alejado ¡sin tener la más remota idea del evento precipitante! Pero mi posibilidad de supervivencia aumentó, porque aproveché el conocimiento de mis amigos caimanes. Soy objeto de la selección natural porque me comporto como si supiera que cuando "algo" me muestra los dientes, ello significa peligro.

Lo anterior es lo que constituye la generalización de los significados ya mencionada, y que también se logra por ensayo y error. Considero que éste es el significado que suministra el nicho informativo específico del animal, lo que hacen quienes están cerca de mí y lo que ello significa para mí.

Aunque evidentemente se trata de reconocer patrones, dicho reconocimiento depende totalmente del contexto, por lo cual no se puede trasladar un cocodrilo del Nilo al Amazonas y esperar que sobreviva. En este caso ya no habrá ninguna familiaridad de patrones, ningún acoplamiento de lo interno con lo que se percibe en el exterior. El cocodrilo ya no reconocerá nada en el ambiente, pues, infortunadamente su sistema espera un conjunto de características externas, completamente diferentes de las que lo rodean. En otras, palabras ¡la abstracción ha sido engañada!

Una nota adicional. Da la impresión de que la abstracción buscara acoplar lo interno con lo externo. El sistema reconoce como familiares patrones que a lo sumo son semejantes. Recordemos que para la "impronta", se apela claramente al reconocimiento de patrones y, por tanto, a una abstracción que da origen y se asocia con la comprensión o con el significado. Otro ejemplo: recientemente se creó con un microchip una abeja artificial que efectúa la danza, se comunica con otras abejas reales y ahí las tenemos a todas volando en busca de comida (Montague et al., 1995). De modo que no necesariamente tiene que ser una abeja: ¡basta con un patrón geométrico retradimensional relativamente familiar y dinámico!

Papel de la mímica en el desarrollo del lenguaje

Volvamos a la mímica y al papel que desempeña en el desarrollo del lenguaje ¿Cómo logró la selección natural que la mímica se convirtiera en una propiedad intrínseca? Obviamente, sólo por vía de la mejor resistencia, ¿o si no qué? Partimos de la capacidad de imitar y estamos

llegando al deseo de imitar, que es el paso posterior crucial. El instinto de imitar se amplifica porque a la mayoría de los animales les resulta muy fácil imitar mediante el sistema auditivo. ¿Por qué? Porque un sonido que se oye se puede reproducir una y otra vez hasta que cuadre con lo que se oyó. Ya señalé que es más difícil imitar mediante el sistema visual porque, en genera!, uno no se observa haciendo algo. Así, la mímica evolucionó de manera rápida y exuberante allí donde encontró fácil florecer.

Mímica de los sonidos

Es obvio que los animales emiten sonidos y además pueden oír los sonidos que ellos mismos emiten. El PAF de la vocalización cambia por completo las cosas, porque en este caso el animal puede acoplar a sus propiedades motoras cualquier secuencia sensorial, o sea que puede tratar de imitar cualquier sonido que oye (recordemos lo dicho sobre el trino de las aves).

La vocalización es un fenómeno fascinante. Por alguna razón, en lo referente al lenguaje humano, tendemos a equiparar la vocalización con el lenguaje, pero la vocalización es mucho más antigua. La verdadera riqueza de la vocalización actual evolucionó cuando ésta se acopló con la intención o prosodia. Pero la vocalización ocurrió primero, probablemente como accidente motor que desembocó en algo útil y, por tanto, me objeto de selección natural.

En un comienzo, la vocalización era parte de un PAF bastante sofisticado. ¿Cuál? Cuando me duele, grito. Y grito porque me duele, pero esta vocalización es también una forma de defensa. Cuando uno grita, tiende a sorprender momentáneamente al animal atacante, humano u otro, cosa que lo distrae por unos instantes de su ofensiva. Sí los gritos son muy fuertes, puede que el atacante se detenga, o incluso que se aleje. En este caso se incrementan las posibilidades de supervivencia. Pensemos ahora en el sentido evolutivo: uno grita cuando es mordido o atacado, de donde evolucionó el hecho de que uno grita cuando piensa que va ser atacado o mordido. El siguiente paso es gritar cuando se siente dolor, aunque el motivo no tenga nada que ver con e! de ser atacado. Luego vienen las generalizaciones: un fuerte golpe en el abdomen, un calambre en la pierna, un golpe del dedo del pie al tropezar contra una piedra.

De una mera representación de respuestas ante la actividad externa, la vocalización pasa a representar la actividad interna. La vocalización es un reflejo motor de alerta, aunque nótese que no es sólo una respuesta a algo externo. Ciertamente el despertador es un objeto muy "alertante", pero la "alerta" es un estado interno que se puede generar tanto desde el interior como desde el exterior. Transcurridas unas horas, me percato de que por error dejé las llaves en el automóvil cerrado: ¡Ay!, ¡no! Esto, definitivamente, es "alerta", generada a partir de un estímulo puramente interno, consistente con el concepto de que dejar las llaves en el automóvil cerrado resulta perturbador. El concepto es el estímulo. Así mismo, un sueno puede ser tan intenso que, de hecho, despierte al durmiente, y esto también es "'alerta" puramente interior. El sistema nervioso central se halla constantemente bombardeado, tanto por estímulos externos como internos, por lo cual ambos son equivalentes. Es así cómo se llega a que el animal grite porque lo han mordido realmente, o porque siente en su interior que ha sido mordido.

Así, los animales oyen ruidos, hacen ruidos, se oyen entre sí haciendo sus propios ruidos y aprenden el significado de los ruidos cuando los emiten y cuando oyen los mismos sonidos en otros animales. Ya se dijo que este tipo de mímica probablemente es el mejor modo de asociar las cosas, porque cuando hay furia y se emite un sonido de furia, se llegará a reconocer que estos mismos sonidos indican "furia" en otros animales, o sea que los otros tienen el mismo tipo de experiencia interna que uno tuvo al emitir cierto ruido. Antes mencionamos que igual sucede con la risa, la cual reconocemos porque la asociamos con nuestra propia risa.

La mímica floreció espléndidamente en estos sistemas, porque podemos oír los sonidos que emitimos y emitir los sonidos que oímos. Las complejidades del significado interno y la expresión externa florecerán y se desarrollarán, si además existe un aparato que genere sonidos y parrones de sonidos suficientemente complejos, como tos que nos permite nuestro sofisticado mecanismo laríngeo (Hirose y Gay, 1972; Passíngham, 1981; Doupe, 1993; Zhang et al, 1994;

Davis et al, 1996; Jurgens y Zwirner, 1996; Jurgens, 1998; Doupe y Kuhl, 1999) y la siringe de las aves con su amplio rango de sonidos (Goller y Suthers, 1996a, b; Goller y Larsen, 1997a, b; Wild. 1997a, b; Suthers, 1997; Suthers et al, 1999). Por otro lado, la vaca sólo puede mugir, siendo esto todo: no tiene otras voces, como para hablar. El rango del aparato fonador de los humanos y de muchas aves es enorme, por lo cual naturalmente se selecciona como un excelente medio de comunicación.

Mímica visual

Muy común también en el reino animal, aunque no tan fácil de generar, es la mímica mediante el sistema visual. Tenemos el caso del lenguado que, aunque tal vez no sea la más elegante o bella de las criaturas, es sin embargo fascinante por su intención. Pensemos cómo es: tiene los dos ojos a un lado del cuerpo. Su superficie es oscura en el lado dorsal y dará en el ventral. Cuando el lenguado se posa en el fondo del mar, se funde en la misma imagen del medio que lo rodea. Lo intrigante en este caso es que, al incorporarse en la imagen de su universo, este animal crea con la superficie de su cuerpo un patrón que reproduce las propiedades visuales del mundo a su alrededor sobre un pedazo del fondo de! mar, que no verá nunca porque él mismo forma parte de esa imagen. Como los ojos miran hacia arriba, el pez no está en posición de ver el terreno debajo de su cuerpo. La imagen se configura para ser vista por los demás y trata de imitar el contexto visual de lo que rodea al pez en reposo. El lenguado crea en su piel, para los otros peces que lo circundan, un patrón visual similar al área sobre la que se encuentra. Obviamente, si se le cubren los ojos no puede realizar tal patrón. Si se le coloca sobre un tablero de ajedrez, intentará copiar un patrón que se asemeje visualmente a una extensión del tablero. Lo importante es que el pez debe poder generalizar, abstraer lo que ve y tratar de copiarlo sobre su piel. No logrará una gran semejanza con el tablero de ajedrez — son obvios los problemas de su sistema óptico ante este problema — pero indudablemente hará un gallardo intento. Desde el punto de vista del sistema visual, se trata de un hermosísimo caso de mímica. El pez es capaz de crear un fragmento de una realidad inexistente, el cual, sin embargo, es lo suficientemente semejante al terreno como para que otro animal no discierna discontinuidades en lo que ve (figura 11.2). Este comportamiento de camuflaje del lenguado sólo puede explicarse si la abstracción interviene en este tipo de generación de patrones.

Figura 11.2
Fotografías de lenguados que ilustran su capacidad de camuflaje mediante el cambio de la apariencia para imitar el color y la textura del fondo. Los cambios adaptativos ocurren en 2-8 segundos. Las imágenes de la izquierda y del centro son del mismo pez. (Imagen de LA izquierda tomada del sitio web www.richimond.edu/~ed344/webunits/vertebrates/camouflage-html;imágenes del centro y derecha tomadas de Ramachandran et al.. 1996, figuro 1, p.816.)

El calamar Sepia es otro animal cuya mímica visual es relativamente más evolucionada. Estos cefalópodos tienen en la piel células oscuras llamadas cromóforos, que pueden expandirse o contraerse por activación nerviosa y por tanto parecen cambiar de blanco a negro (Ferguson e

al., 1994; Loi et al., 1996; Shasher et,al., 1996). Gracias a los cromóforos, el calamar puede generar toda suerte de patrones (recuerdan los avisos de neón), de líneas y geometrías de líneas, en una y otra dirección, que se entrecruzan en sus cuerpos. Este efecto espectacular constituye otro ejemplo de un lenguaje prosódico muy complejo, puramente visual, un lenguaje semafórico si se quiere. También es un lenguaje muy rico, porque la sepia puede efectuar estos fugaces patrones muy rápidamente y con un enorme grado de complejidad. Es evidente que este lenguaje transmite un significado entre dos animales; dada la exactitud y rapidez con la cual se imitan ciertos patrones y se añaden otros a los anteriores, es obvio que se trata de algo más que de un mero reflejo insustancial. Hay algo que debe inducir estos cambios con la sofisticación y el control necesarios para ser capaz de producir una señalización con tan increíble grado de complejidad, y es obvio que ese algo tiene impresa en él la intención de hacerlo.

Resumiendo brevemente. A todas luces, el lenguaje se gestó a partir de la abstracción o del pensamiento abstracto o, dicho de otro modo, el proceso generador de propiedades de abstracción en el sistema nervioso precedió por necesidad al lenguaje, y más particularmente al lenguaje prosódico. Hemos definido la prosodia como la expresión externa de un estado interno momentáneo, cuya expresión misma significa algo para otra criatura. Tales estados internos, tanto emociones como intenciones, no existen en el mundo externo y por lo tanto tienen que ser abstracciones. Fue la evolución de la mímica la que permitió que estas abstracciones llegaran a significar lo mismo — o algo parecido — como para que los organismos sacaran provecho de ella. La mímica aporta el factor común para que un comportamiento llegue a tener un significado que permita relacionar los estados internos con los comportamientos percibidos en los demás. Hago esto, cuando siento de esta manera; al ver que usted hace esto, pienso que usted posiblemente está sintiendo lo mismo. Así, a través de los tiempos, evolucionó el "significado".

La mímica se originó en dos formas primarias que, aunque de diversa índole, son reflejos de la abstracción interna. Existe la mímica de copia, que corresponde al método de "oigo este sonido y lo repito hasta que cuadre con lo que oigo" y el método de extrapolación, como cuando el lenguado se abstrae a si mismo en un patrón visual que sólo verán los demás. En términos generales, en una comunicación significativa, la copia suministra los elementos comunes que mediante las extrapolaciones permiten distinguir los matices entre las criaturas.

Acerca del lenguaje humano

Por lo todo lo anterior, debe quedar claro que el lenguaje, de cualquier clase que sea, no se materializó súbitamente como un relámpago en la evolución biológica a partir de la nada. Lo que se dirá a continuación no se aviene bien con quienes piensan que el único lenguaje verdadero es el de los humanos, pero es lógico considerar que la abstracción y la prosodia, cuyo significado intra e interespecies se gestaron lentamente a partir de la mímica, deben constituir el requisito o preámbulo evolutivo de aquello que hoy conocemos como lenguaje humano.

El lenguaje, y el humano en particular, surgió como extensión de las condiciones premotoras, tales como la creciente complejidad de la intencionalidad concomitante con el enriquecimiento del pensamiento abstracto. Sencillamente los humanos nos vimos obligados a hacer más con lo que teníamos, con las capacidades motoras y con la gradual sofisticación del movimiento deliberado, que se logró modificando, y a veces suprimiendo, los PAF existentes. La expansión del rango de la expresión motora probablemente ocurrió al mismo tiempo que la habilidad de cancelar PAF.

Recordemos que en el capítulo 7 se mencionó que la capacidad de cancelar un PAF liberado se basa en la creciente complejidad del sistema tálamo-cortical y también, de manera por demás clara, por el desarrollo de la conectivídad cortico-espinal (el llamado tracto piramidal). En una palabra, vemos el aumento de la intencionalidad sofisticada como base de los movimientos intencionales. La evolución de estos sistemas especializados, como el tracto piramidal que se relaciona con los movimientos de los pies y de los dedos, así como con la activación de los nervios craneales que inervan los labios, la lengua, la faringe y la laringe, fue la base para

cancelar ciertos PAF, eliminando así limitaciones internas, lo cual dio lugar a la increíble destreza que vemos en los mamíferos superiores, particularmente en los simios y en los humanos. Es justo decir que la evolución y el enriquecimiento del manto cortical, como ocurrió en el sistema motor, es el más importante de los mensajes que conducen al desarrollo de la corteza. Ha sido una habilidad del sistema nervioso haber aumentado el número de posibles estados funcionales sin violar los PAF sobre los cuales cabalgan los movimientos voluntarios. En efecto, los PAF no se pueden cancelar, al punto de eliminarlos o de volverlos completamente latentes. Ya se discutió el importantísimo papel que desempeñan en la reducción de la sobrecarga de computación del sistema nervioso. En realidad, lo que distingue a nuestro cerebro como el más exquisitamente capaz intelectualmente es el refinado equilibrio evolutivo entre la eficiencia automática de cómputo y la capacidad de matizar los movimientos. Estas cuestiones son tan básicas y elementales que las damos por garantizadas, al punto de que rara vez nos percatamos de la increíble coordinación que se requiere en un PAF para algo tan común como hablar en público. Para ello, hay que mantenerse en posición erecta, vertical o tal vez, según las circunstancias, dando pasos mientras se efectúan constantemente complejas sinergias que sincronizan entre sí los mecanismos respiratorios, laríngeos y orofaciales ¡para producir siquiera una palabra reconocible! A lo anterior hay que añadir los movimientos prosódicos de gesticulación de los brazos y las expresiones faciales, con lo cual tendremos ante los ojos un evento motor bien complejo. Sin embargo, para muchos esto no es más que caminar y hablar a la vez.

Tomemos el ejemplo de la evolución de la coordinación ojo-mano, en la cual la reciente complejidad de la conectividad cortical amplifica las posibilidades motoras aunque sin violar los PAF subyacentes a todo movimiento voluntario. Al respecto, puede decirse que este sistema más reciente se entrelaza con los PAF ya existentes y los utiliza como columnas o contrafuertes de apoyo para los nuevos elementos. Metafóricamente, una intencionalidad más rica exige de una escenificación en la cual se representen obras que nunca se habían interpretado previamente, lo cual nos es familiar, pensando en las bases de la abstracción, pues en realidad son un mismo fenómeno. En el capitulo 6 se discutió que es precisamente así como se decanta el pensamiento abstracto. Pero ¡nótese que fue el uso de los PAF lo que permitió la vocalización! El nuevo sistema, aprovechando el amplio rango de los patrones (de sonidos), aumentando las capacidades prosódica y de intencionalidad, utilizó y expandió el PAF de vocalización. Y así como el incremento en la complejidad de la intencionalidad conllevó un aumento en la riqueza de la co-ordinación ojo-mano, también la creciente necesidad de expresar abstracciones internas aprovechó e incrementó la destreza del mecanismo vocal del animal. No sólo lo hizo con las estructuras orofaciales y laríngeas para producir los diversos sonidos, sino con todo el aparato respiratorio, indispensable para generar el parrón de flujo de aire requerido para emitir unos sonidos tan específicos. (Wild, 1994; Davis et al, 1996). Estos sonidos, aprendidos por imitación y repetición, son los fonemas de nuestra lengua. Representan y son la base de la "granularidad" misma del lenguaje, independientemente del idioma utilizado.

En los numerosos patrones motores que deben activarse para !a compleja coordinación ojo-mano (Jeannerod, 1986; Miall, 1998), existe un número finito de posibles combinaciones. Lo mismo sucede con los fonemas o las letras de un alfabeto: es mucho lo que se logra al mezclar estos granos finitos de motricidad, para producir un increíble mosaico de expresiones. Cuando a este lenguaje le añadimos nuestras, ya de por sí, ricas capacidades prosódicas, no cabe duda de que como especie evolucionamos para expresar nuestros estados internos con muchísima mayor propiedad que cualquier otra especie.

En cuanto a la teoría lingüística, una propuesta teórica ha producido una gran controversia en el siglo pasado, referente al concepto de modularidad en la función cerebral. En su libro sobre las bases neurológicas del lenguaje, Chomsky (1972) postulaba que la única capacidad del sistema nervioso humano de generar un lenguaje complejo se debía a una función cerebral muy específica, probablemente ocurrida en una región muy especializada. Esto no es necesariamente así. Es cieno que el apoyo a dicha propuesta se basaba en la existencia del área de Wernicke (área de comprensión del lenguaje o de asociación auditiva), en el área del habla de Broca y en

los problemas derivados de lesiones en tales áreas (alexia o incapacidad para leer, anomia o dificultad para encontrar palabras, afasias o desórdenes del habla). Sin embargo, la teoría no es del todo satisfactoria, porque el sistema nervioso central tiene serias limitaciones para reorganizarse más allá de cierto punto, además de que la localización de tal área es imprecisa y a la posibilidad de que dichas funciones migren a otras partes del cerebro (como en la epilepsia). Estos hallazgos contradicen la perspectiva simplista según la cual el cerebro es una organización puramente modular de tipo frenológico, que por muchos años invadió la neurología y la cual vuelve a emerger actualmente en lo que pudiera llamarse una neofrenología, por el uso a veces inadecuado de técnicas para obtener imágenes por sistemas no invasivos. Pero la dificultad para ubicar un evento cerebral con una precisión de unos pocos centímetros cúbicos de tejido, tampoco es suficiente para descartar por completo la noción de medularidad, especialmente si tal medularidad es considerada como una estructura funcional, a veces transitoria.

Mis razones particulares para aceptar esta perspectiva modular se relacionan con casos como el de la paciente, descrito en el capítulo 7 y con el planteamiento de los PAF. Una lesión cerebral tan extensa que no dejó sino un mínimo de módulo, permite que la persona genere no sólo fonemas sino también ciertas palabras (figura 11.3). Esto indica que el PAF motor es necesario y suficiente para la expresión de determinado módulo, pero no es suficiente para otros aspectos del habla, tales como generar un pensamiento detrás de las palabras, o incluso el contexto apropiado en el cual tales palabras deben usarse.

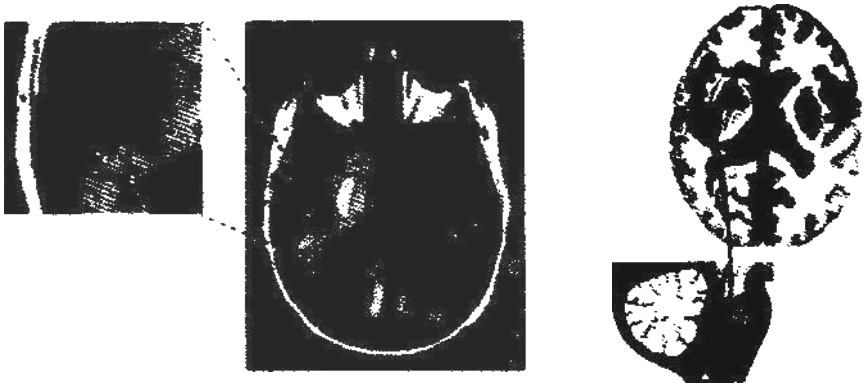
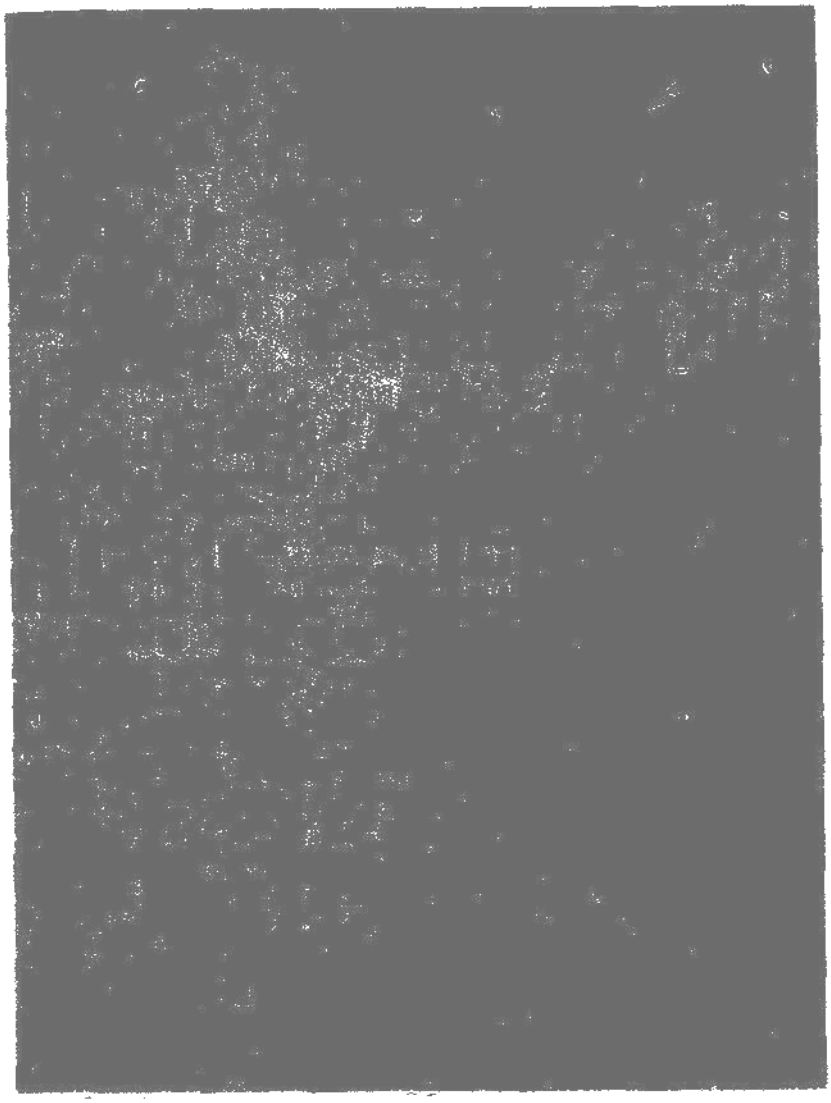


Figura 11.3

Tomografía de emisión de positrones (TEP) de una mujer que ha estado en coma por más de 20 años, en estado vegetativo permanente. Con poca frecuencia produce palabras aisladas de manera espontánea, que no guardan relación alguna con la estimulación externa. Su condición se produjo por tres accidentes cerebrovasculares masivos consecutivos, que destruyeron la mayoría de ambos hemisferios cerebrales, excepto los ganglios basales, partes del tálamo y la región cortical izquierda llamado área de Broca, que controla la emisión del habla. Las áreas resaltadas indican las pocas regiones cerebrales con alguna actividad metabólica significativa. (Ver capítulo 7, p. 152.) Este caso ilustra que ciertos circuitos cerebrales pueden soportar lo expresión motora «modulan. En el caso de palabras habladas, ello requiere una articulación fonológica adecuada y la activación sincrónica de diversos músculos (incluyendo el diafragma), además de las cuerdas vocales. (Adaptado de Schiff et al.. 1999, figura 4.)



Jasper Johns, Alfabetos Grises. 1956. Encáustica sobre papel periódico y lápiz sobre lienzo, 168 x 124 cm. © Jasper Johns. Autorizado por VAGA, Nueva York, NY. The Menil Collection, Houston.

12

¿LA MENTE COLECTIVA?

El problema de la comunicación

En el capítulo anterior, la abstracción fue descrita como un elemento de una categoría muy general de la función nerviosa, derivada de la organización global del cerebro como producto de la selección natural. Ya se señaló que el sistema nervioso tiene grandes áreas que no se ocupan de funciones por segmentos. La unificación de esta función segmentaria en un conjunto es una abstracción que permite al animal crear en su interior una imagen quinestésica de si mismo, dándole la habilidad de colocarse en el contexto del mundo exterior. Más adelante, la característica más significativa en la tálamo-cortical, del cual los humanos somos e! mejor y más sofisticado de los ejemplos. A la pregunta de qué ventaja primaria ofrece tal enriquecimiento, se respondería que indudablemente es la capacidad de cancelar o modificar los PAF, la cual, aunada con la de abstraer el "sí mismo", produce comportamientos complejos. Así, muchos animales (relativamente superiores) se esfuerzan para intentar escapar de problemas inesperados o para evitar verse sorprendidos e inmovilizados. Para comportarse así, el animal debe configurar una imagen de sí mismo en el contexto de lo que lo inmoviliza. Además debe encontrar una solución motora al problema de la inmovilización, transcendiendo la rutina de los PAF de caminar, rascar o morder, inadecuados en ese momento. Consideremos como ejemplo el problema que enfrentaría un albatros si caminara en vez de volar. Tanto su tamaño como su geometría corporal serían totalmente diferentes, como también lo sería la imagen de sí mismo que debería desarrollar.

La capacidad de abstracción del sistema nervioso es fundamental tanto para la creación de la imagen de sí mismo como para adquirir la posibilidad de cancelar o modificar los PAF. Estas abstracciones escapan hacia el mundo externo, ya que deben ser entendidas, aprendidas y luego comunicadas a través de la mímica. (Si actuar de este modo ayudó a mis parientes a escapar, tal vez me ayude a mí también.)

Pero aquí los humanos diferimos sustancialmente de, digamos, la ardilla, que se retuerce y da vueltas para escapar de un predador. La ardilla puede mostrar a otra ardilla o a otro animal que sus contorsiones y lances ayudan a escapar del enemigo, pero no puede "decir" a otro que eso es así. Con el debido respeto por las ardillas, el mensaje sería mucho más eficaz a través del lenguaje hablado, el cual facilita la comunicación de abstracciones internas, tanto desde el punto de vista del detalle como de la exactitud.

El lenguaje hablado, al contrario de la prosodia corporal o de la gesticulación facial, amplifica enormemente el ámbito de la comunicación, así como el rango de los sentidos. ¿Cómo? Cualquier ejemplo sirve. Mi amigo está parado en mis hombros y mira por encima de una pared elevada. "¿Qué ves?", pregunto. Entonces me cuenta. El lenguaje hablado claramente me permite "ver", allí donde mi vista no llega.

O bien mi amigo extiende el brazo y toca algo del otro lado. "¿Qué hay allí, qué tocaste?", y ahora puedo "tocar" lo que antes no podía. Asoma su cabeza al otro lado y ahora es mi olfato el que se ha extendido.

Lo anterior plantea dos puntos. En primer lugar, aunque mi amigo me podría comunicar lo que vio, sintió y olió sólo con prosodia corporal y gesticulación facial, posiblemente se perdería detalle, claridad y, por supuesto, velocidad, si lo que se quiere finamente es transmitir la información lo más exactamente posible. Generalmente esto es lo que sucede con cualquier tipo de comunicación, incluyendo el engaño con palabras y acciones (la zarigüeya que se hace la muerta). Para ser eficaz, un engaño debe expresar claramente la abstracción interna, independientemente de la veracidad con que ésta represente la realidad externa. Lo único que importa es que la intención se transmita clara y precisamente.

Un segundo punto se refiere a que el lenguaje hablado extiende los sentidos, pero dentro de ciertos límites. Tal extensión se ve limitada, porque los elementos vocales y auditivos tienen a su

vez límites en sus combinaciones. La intensidad del grito y el alcance de lo que podemos oír a distancia tienen límites. Hay, pues, barreras bien definidas en esta comunicación — y parecen bastante limitantes, pero, ¿en realidad lo son?

Digamos que mi amigo está ahora en una escalera mirando por encima de la pared. Apenas alcanzo a oírlo, y me grita lo que ve. A mi vez yo le grito a otra persona a distancia, ésta a su vez a otras y así sucesivamente. Esta cadena de comunicación le permite a la persona que se encuentra lejos "ver" con los ojos de mi amigo lo que hay al otro lado de la pared. Ahora bien, consideremos el tener teléfonos celulares.

No hay duda de que al ampliar el rango de la comunicación se amplía asimismo el rango de los sentidos. Tampoco hay duda de que el hombre primitivo aprendió y aprovechó esto, enviando mensajeros a pie y a caballo, y que por medio de señales visuales, como banderas, señales de humo y superficies reflectoras podía transmitir la información a mayor distancia, salvando obstáculos, para pasar así al otro lado de la cadena, en el cual se mantenía la comunicación palabra a palabra. Ésta era una técnica de transmisión de información a grandes distancias de manera segmentada o nodal, no muy diferente de la conducción de la señal del potencial de acción.

Pero al contrario del potencial de acción que no falla y que no cambia, la comunicación descrita es limitada. Aunque el lenguaje amplifica el rango de la comunicación (y por ende, el rango teórico de los sentidos), lo hace a expensas de la velocidad y de la precisión. Quien sepa de la distorsión de la información en el chisme, sabrá a lo que me refiero. Cuando el chisme llega de vuelta, es tal la distorsión que ha sufrido, que casi no se le reconoce. En general la distorsión es cómica, como cuando se confunde una palabra en un juego de "pase la voz", pero en otras ocasiones no es tan Jocosa, como en el caso de la orden militar "el regreso a las tres" que se convierte en "el regreso en tren". El antiguo adagio de que demasiados eslabones debilitan la cadena se aplica muy bien al lenguaje hablado, donde "debilitar" conlleva deficiencias en detalle, precisión y velocidad. Incluso, si por alguna ratón, la transmisión de información fuera fiable y no cambiara en los puntos de unión de la fuente hasta el final (de la vía de comunicación), siempre habría cierta distorsión de la señal global, porque los elementos receptores no reciben la señal sincrónicamente. Para que una señal (mensaje) tenga un impacto apropiado, casi siempre debe llegar a muchos destinos y no sólo a uno.

Examinemos el flujo de información en un contexto evolutivo más amplio. ASÍ como a las células aisladas les tomó muchísimo tiempo organizarse y formar un animal, a los humanos les ha tomado mucho tiempo evolucionar en una sociedad con lazos estrechos, y ello básicamente por las mismas razones. En el capítulo 4 vimos que el requisito para que las células aisladas se agruparan en animales multicelulares fue la comunicación — el significado — entre las células, lo cual tomó muchísimo tiempo. Aun en las colonias celulares más primitivas, la importancia de la recepción simultánea de la señal es muy clara cuando pensamos en la combinación de elementos motores que deben actuar sincrónicamente para realizar cualquier movimiento, así éste sea muy simple, tal como el PAF de natación de la lamprea. Al desarrollarse el sistema nervioso, evolucionando hacia una sociedad celular específica, la simultaneidad en la activación como forma modular básica de la función no sólo conservó sino que aumentó sus capacidades. Como la necesidad de movimientos más complejos se vio incrementada, me necesaria la activación sincrónica de gran variedad de sinergias musculares. Esto se logró mediante la coordinación de señales temporales en sirios como el núcleo de la oliva inferior y la variación de las velocidades de conducción de diversas fibras nerviosas según su longitud, para asegurar la llegada simultánea de la señal a sus blancos desde muy diferentes distancias.

En el presente evolutivo, la solución que encontró el cerebro al problema de la unificación perceptual y de su subproducto, la cognición, es el ejemplo más contundente de conservación, elaboración e incorporación de la activación simultánea que nos ofrece la selección natural. En el capítulo 6, dedicado únicamente a este problema, se describe el sistema tálamo-cortical como una esfera funcional casi isocrónica (sincronizada) que unifica temporalmente los elementos fraccionados de la realidad interna y externa, representados por la actividad neuronal de regiones

cerebrales espacialmente dispersas. Según esta perspectiva, tal activación simultánea del sistema produce una unidad perceptual: el libro que se siente en las manos, la voz interna que parece leerlo para usted, la silla que siente a su alrededor, todo parece un solo evento que ocurre en el presente. Imaginemos los problemas causados por la verdad perceptual, si la activación no fuera simultánea. Incluso habría dificultades con una sola modalidad sensorial. Si lo que se siente en la lengua, los cambios de presión en los dientes, la sensación en el paladar y en las mejillas no se unificaran temporalmente, en poco tiempo destruiríamos ese aparato compuesto por esos elementos, tan importante para la ingestión de comida, entre otras cosas. Incluso con un pequeño desfase en la sincronía de la percepción de estas sensaciones táctiles, el simple acto de masticar la comida ocasionaría mordeduras en la lengua y laceraciones en las mejillas.

Si la activación no fuera simultánea, se multiplicarían los problemas al combinar varías modalidades sensoriales. Si lo que oímos no coincide con lo que sentimos en los dedos, no llegaríamos nunca a tocar un instrumento musical. Para el caso, tampoco podríamos enunciar palabras o montar en bicicleta. En resumen, si la coordinación de la actividad no fuera simultánea, resultaría imposible integrar los diversos sistemas sensoriales en una unidad perceptual, y sin esto el "sí mismo" se fragmentaría. De no haberse resuelto el problema de la unificación durante la evolución, no estaríamos discutiendo esto ahora. Es decir, al desaparecer la sincronía desaparece el "sí mismo".

Igualmente, vemos que en sus albores la sociedad humana hubo de resolver el problema unificador de transferir información. Había distorsión de mensajes, porque éstos se distribuían a diferentes velocidades entre diversos elementos de la sociedad, por lo cual no todos los miembros los recibían simultáneamente. Las cosas cambian, y lo que es importante un día, al día siguiente puede no serlo, por lo cual se generan mensajes contradictorios. El resultado es que la verdad consensual sobre el estado de problemas globales o incluso locales no es ni completa ni estable.

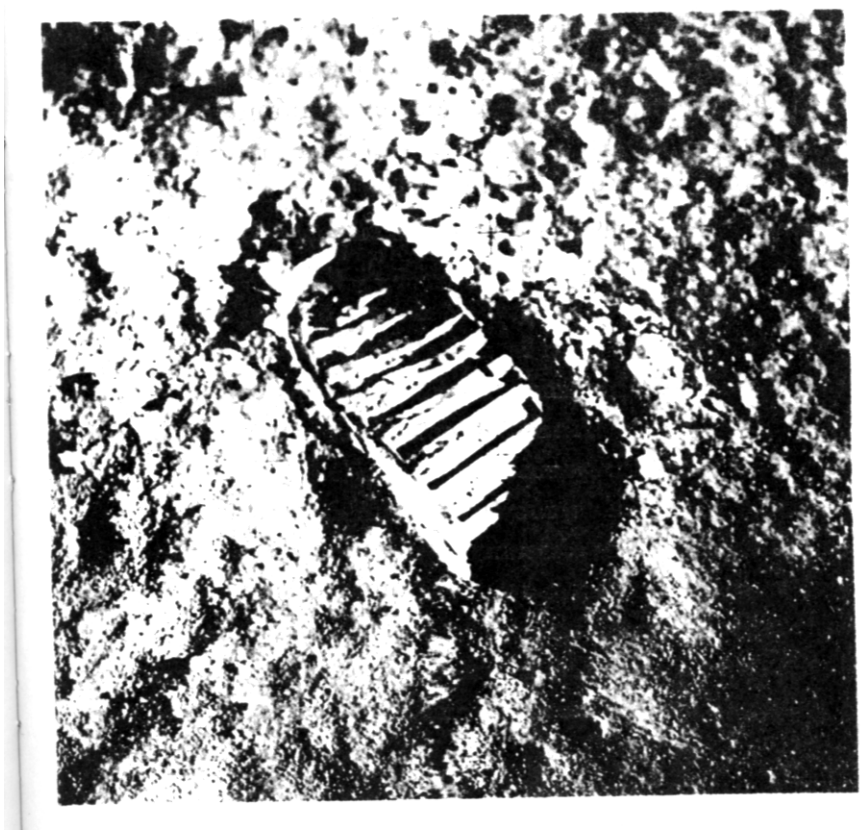


Figura 12. 1

Un pequeño paso para el hombre, un salto gigante para la humanidad. La huella del pie del astronauta Edwin “Buzz” Aldrien en el suelo lunar durante la misión Apolo XI en 1969, como

parte de un experimento para estudiar la naturaleza del polvo lunar y los efectos de la presión en la superficie. (Del sitio web nssdc.gsfc.nasa.gov.)

De la misma manera como la evolución del cerebro solucionó el problema de la unificación perceptual incorporando y usando la activación simultánea, la abstracción fue un producto de la actividad cerebral intrínseca del cerebro que reforzó el edificio social a través de la transmisión de información, en el sentido consensual de la verdad de esta información. Transmitido primero mediante dibujos y luego mediante la palabra escrita, el pensamiento abstracto ha llevado a una serie de avances tecnológicos que resultaron en una comunicación cada vez más precisa y detallada, la cual hoy en día es prácticamente simultánea entre individuos muy distantes entre sí. "Un pequeño paso para el hombre, un salto gigante para la humanidad" puede sonar banal, pero además de lo fascinante de ese momento histórico, el mundo entero lo vivió al mismo tiempo, casi en el momento exacto en que se produjo (figura 12.1).

En la década de los 90, experimentamos el último evento de esta serie de avances comunicativos: la Red Mundial de computadores o World Wide Web. Sería acertado decir que la Red representa tal vez el mayor avance en la comunicación, sólo superado por la invención del lenguaje escrito. El primer invento alteró el curso de la civilización humana y éste tal vez también lo haga. Aun en su infancia, la Red ya ha reconfigurado profundamente las sociedades más desarrolladas y continuará haciéndolo en el futuro, de maneras difíciles de imaginar.

La Red: tal vez un centro de atracción, pero ¿una mente colectiva?

Además de la Red, consideremos otros sistemas de comunicación actuales. La señal de televisión llega a millones de personas, tal como lo hacen los periódicos, aunque éstos últimos mucho más lentamente. Pero ninguno de los dos es interactivo. Cuando se expresa un mensaje u opinión, lo recibimos, opinamos sobre él y ahí termina el caso. Puede que lo discutamos con amigos, pero no contribuimos realmente en nada a ese flujo unidireccional de información. Podríamos escribirle al editor, pero esto no pasaría de ser lo mismo que apedrear a un elefante y, lo que es peor, esta interacción es irritantemente lenta. Comparado con una simple conversación en la cena, lo anterior no puede considerarse como interactivo.

El rango y la velocidad de transmisión del teléfono y de algunas formas de radio es prácticamente instantáneo, pero al aumentar un poco el número de usuarios, la comunicación bidireccional rápidamente se torna en unidireccional. Todo conductor de taxi podrá decir que pese a oír la actividad por determinado canal, cuanto mayor sea el número de usuarios, más difícil resultará captar una palabra aquí y allá. La anchura de bandas de frecuencia se satura, lo cual desafortunadamente ocurre muy fácilmente.

El teléfono conecta prácticamente sin retraso a mucha gente en cualquier sitio. ¿Pero, con cuánta gente podría usted interactuar de esta manera? En teoría, se podría llenar un auditorio y dirigirse a esta multitud por altoparlante o conferencia telefónica, pero si más de dos personas responden, se genera un ruido ininteligible.

De nuevo, cuanto mayor sea el número de usuarios, menos bidireccional y más unidireccional será la comunicación, de modo que la interacción se limita a escuchar o a hablar, pero no a las dos cosas.

Muchas cosas han cambiado desde los tiempos de Paúl Reveré, en temas como el detalle, la exactitud, el rango y velocidad de la comunicación, en los cuales ya no existen limitaciones importantes para la comunicación individual. Nuestras capacidades sólo se ven limitadas cuando insistimos en que el flujo de información sea bidireccional o interactivo y que sus rangos sean amplios y prácticamente simultáneos entre un vasto número de emisores y receptores. Si lo que deseamos es un flujo de comunicación semejante a la del cerebro, saltan a la vista las limitaciones de la transmisión global.

Sin embargo, estas limitaciones están desapareciendo. Al menos en teoría, la Red es una estructura análoga al sistema nervioso, puesto que en cierta medida parece funcionar resolviendo el problema de la unificación de la sociedad (figura 12.2).

Hoy en día, la Red suministra una activación comunicativa simultánea, completamente nueva hasta el momento, lo que permite a un solo individuo enviar un mensaje a miles, a cientos de miles, incluso a millones de personas de manera casi instantánea. Además, a pesar de estos números, la interacción sigue siendo bidireccional: cualquiera de los receptores o rodos ellos pueden responder al mensaje, retrasándose tan sólo en lo que tarden en formular las ideas y en redactar la respuesta. Es decir, en gran parte el retraso dejó de ser de tipo técnico.

http://www

Figura 12.2
La World Wide Web. (Red Mundial de Computadores.)

Vemos una buena analogía entre el flujo de información en la Red y el flujo de información entre neuronas, pero, ¿demostrará también la Red algún tipo de interiorización intrínseca? En tal caso, ¿qué será lo que interioriza? Por los capítulos 3 y 8 sabemos que la operación global del sistema nervioso reconoce e incorpora los patrones repetitivos de actividad neural (memorias, PAF y otros similares), y que constantemente intenta aumentar la eficiencia de cómputo, a la vez que trata de disminuir su sobrecarga. Intuitivamente, el aumento en velocidad y volumen del flujo de información que vemos en la Red debería encajar en este concepto de interiorización, pero, ¿es ésta una analogía válida? Y si lo es, ¿serán provechosos sus resultados?

Si las neuronas engendran la mente, puede la gente — las mentes — que representa cada punto nodal de la Red generar o convertirse en una mente colectiva? ¿Puede la Red soportar a la conciencia humana y, en tal caso, en qué consistiría esto? A primera vista, la Red y el cerebro son muy diferentes. El cerebro es algo viviente y la Red no lo es. ¿Puede algo no biológico tener mente?

Esta última cuestión no es retórica, ni se limita a las discusiones sobre la Red. Es de gran importancia potencial para la sociedad humana y exige la atención seria y concertada de muchas disciplinas.

A primera vista, el funcionamiento de una Red parece tener características comunes con el cerebro, pero, al examinarla de cerca, incluso esta seudoanalogía se derrumba rápidamente. A lo largo de este libro he puesto constante énfasis en la perspectiva de una arquitectura funcional y, vista así, en el mejor de los casos la Red es a lo sumo muy torpe. En la práctica, tal como la conocemos, la Red no podría soportar la conciencia de muchos. Por un lado, es un sistema muy "ruidoso" y, aunque veloz para muchas tareas, como transportar un mensaje de un sitio a otro, no es lo suficientemente rápida en sus parámetros integradores como para soportar a la conciencia de la manera como lo hace el sistema nervioso (que aún es nuestra mejor, si no la única, referencia o parámetro estándar). Se recordará que el sistema nervioso aumenta su propia eficiencia mediante la modularización de su función (ver Miklos, 1993). La Red, como la conocemos actualmente, no es modular. La mejor comparación que pudiera hacerse de la Red sería con un celentéreo hidra o medusa. Y si la medusa tiene alguna conciencia, ésta no tiene las características que soporten, en conjunto, una mente colectiva. Finalmente lo que se necesita es un subsistema de captación y otro de distribución, con una interacción simple en el punto de unión entre ambos.

El concepto de conciencia colectiva no es nuevo. El resultado de unas elecciones se toma como un mandato del pueblo que representa la decisión colectiva de la gente. Las ventajas de

interactuar con un número aun mayor de mentes y las experiencias de cada una de ellas serían muy provechosas para la interiorización, pues el sistema nervioso atiende en particular a estímulos novedosos, convertidos en propios a través de la repetición. Si alguien nos previene: "No juegues con una araña negra que tenga una mancha como un reloj de arena en la barriga", pero pasa a decir inmediatamente: "No lo creerás, pero una vez vi una ballena voladora", probablemente recordaremos la precaución de la araña cuando ya nos esté picando. Por otro lado, si repetidamente, amigos, padres, profesores y médicos nos previenen sobre los riesgos que corremos si estas arañas nos pican, es muy posible que las evitemos desde el primer encuentro. Lo que queda en la mente es lo que se repite, y la "impresión" de este conocimiento evolucionó debido al remolino repetitivo de la información en muchas mentes, antes que en la propia.

Pero un momento; el conocimiento colectivo y la mente colectiva son dos cosas diferentes. Aunque puede haber muchas maneras de definir la mente colectiva, podemos ponernos de acuerdo en que una de ellas seria: los elementos que componen un todo se combinan de tal manera que, cuando son confrontados en conjunto, se produce e implementa una decisión acerca de lo que habrá de hacerse. Esta decisión puede no ser representativa y probablemente no lo será de la opinión de cada uno de los elementos, pero será un consenso benéfico para el grupo en su totalidad. Es lo mismo que los sacrificios y ganancias de las células aisladas, cuando optaron por socializarse para llegar a los organismos multicelulares. Este proceso culminó con las estructuras colectivas que asumen el papel de tomar las decisiones del animal, a saber, el sistema nervioso.

Considerando seriamente los componentes que deben constituir una mente colectiva, la Red es una buena candidata, en cuanto a requisitos potenciales, para soportar la conciencia de muchos. También se puede argüir que la Red fue creada por el hombre sin el deseo expreso de crear una mente colectiva.

¿Es la Red un sistema nervioso compuesto de sistemas nerviosos, una mente compuesta de mentes? Como ya lo dije, todavía no, al menos no en el sentido clásico de mente colectiva. Comunica ciertamente, pero no piensa. Sin embargo, se esboza ya un proceso global de toma de decisiones, que comienza a tomar forma — y que continuará tomándola —, afectando a todos para bien o para mal.

"Coma basura: un trillón de moscas no puede equivocarse"

¿Es verdad que debemos comer basura? ¿Es esto lógico? ¿Es cierto Éste es el

problema de los números. Siempre se ha cuestionado la tiranía de las mayorías y, como todos sabemos, el documento conocido como "Los derechos del Hombre" (o la Constitución de los Estados Unidos) se escribió en parte para proteger a los ciudadanos de esta amenaza. Sin embargo, si suficientes personas desean que en las escuelas se enseñe el creacionismo jumo con la evolución como teorías igualmente viables y no probadas (y que implícitamente no se pueden probar), entonces así será. Repetidamente se ha demostrado la capacidad de los medios masivos de incidir en la opinión pública pese a que, como ya lo mencioné, los medios de comunicación, al contrario de la Red, no son interactivos ni responden a las ideas del público, el cual hasta el momento ha sido un receptor pasivo de información. Pero gracias a la increíble velocidad, rango y volumen de comunicación de que es capaz, por primera vez la opinión pública podría tornarse realmente en pública — con las ventajas y desventajas inherentes a ello.

Y aquí surge nuevamente el problema de los números. Justamente por la velocidad y volumen de información, la Red puede perpetuar la noción de que el valor de las ideas y creencias se base simplemente en el número de personas que dicen adherir a ellas. ¡No sólo la tiranía de la mayoría, sino una tiranía sesgada y autoseleccionada! Si doscientas mil personas opinan sobre esto o aquello en la Red, deben tener razón. En último término, esta inercia de los números adquiere vida propia y determina nuestros gustos y disgustos, generando así una profecía. Y este fenómeno sin duda se acelerará por las maquinaciones dentro de la Red.

Como individuos, sabemos que las generalizaciones basadas en la opinión popular no son fiables, pero, así mismo, en lo que se refiere al individuo, si no estamos de acuerdo con las

mayorías, seremos marginales y, por tanto, sufriremos las consecuencias de no formar parte del grupo. Obviamente, sí lo que uno dice, inmediatamente puede ser criticado por millones de personas, en poco tiempo se tornará muy difícil separar "lo nuestro" de las creencias y sentimientos de los demás. Bajo tales presiones, el pensamiento necesariamente se hará homogéneo. A medida que la Red se haga más eficiente, estas maquinaciones influenciarán profundamente la autopercepción y se redefinirá el concepto mismo del "sí mismo". La noción de que nuestras ideas nos pertenecen se diluirá, porque una idea dada a la Red, o bien se acepta, e inmediatamente se vuelve obvia, o inmediatamente se rechaza. Esto, en menoscabo de la capacidad de discernir, de la identidad individual y del dominio de nuestras ideas — en esencia, de lo que conforma el fundamento de nuestras creencias y del "sí mismo". Una homogeneización del pensamiento puede no ser buena, pero si ocurre, alimentará la inercia de los números devolviéndose contra sí misma de manera muy implosiva.

La homogeneización del pensamiento, a su vez, homogeneizará la sociedad, perspectiva ésta bastante sombría. En mis viajes de juventud, disfrutaba observando la riqueza de las diferencias culturales, de creencias y de perspectivas. Hoy en día ya no es así; por ejemplo, los niños de Asia, Europa o África desean los mismos productos de consumo, en parte por el bombardeo de imágenes semejantes que les llega a través de los medios de comunicación masiva. Esta tendencia hacia la igualdad se observa por doquier, en la medida en que todo se copia, lo bueno y lo banal — y, en general, es más fácil copiar lo banal que lo profundo. Nos acercamos rápidamente a una cultura mundial de la igualdad, no sólo en cuanto a su parafernalia externa, sino en cuanto al carácter y valores de la sociedad. La fuerza e influencia de los medios de publicidad han hecho casi imposible oponerles resistencia y no hay razón para pensar que la Red no acelere este proceso.

La gran desventaja de la homogeneidad es que disminuye la variación, la cual es la clave de la supervivencia. El sistema será, pues, más deleznable, simplemente por la reducción de opciones, si todos piensan lo mismo acerca de algo o de algún conjunto de valores. Este trasfondo de igualdades hace más fácil —y más probable— exponer la propia vulnerabilidad. Más adelante examinaremos esto.

Finalmente, en la generación de la mente colectiva, al igual que en la evolución, el ensayo y error son indispensables. Puede que nos tome tanto tiempo aprender a implementar tal conocimiento así expandido, como el que les tomó a las células nerviosas el "fabricar" cerebros. Usada adecuadamente podría convenirse en un extraordinario avance pero, de momento, la arquitectura funcional de la Red necesita una revisión general muy seria para aproximarse, siquiera remotamente, al evento colectivo discutido.

¿Es razonable considerar el orden mundial como algo semejante al cerebro? Efectivamente lo es. Lo que observamos es una semejanza de orden, expresada en diferentes niveles, en todas los niveles, desde las células hasta los animales y desde los animales hasta las sociedades. Cabe preguntarse si ésta no es una ley universal. La manera como el sistema se organiza a sí mismo puede reflejar, por ejemplo, cómo logra liberarse de la tiranía de la segunda ley de la termodinámica: "El orden disminuye con el tiempo", lo cual, a su vez, entraña otro mensaje muy profundo. Una de las pocas maneras que hay de incrementar el orden local es a través de la generación de cosas como el sistema nervioso, que recurran a la modularización de la función. Si la modularización es de hecho un universal contra el desorden, tal solución geométrica y arquitectónica seguramente también ha sucedido en otros niveles. Es muy probable que el débil principio antropomórfico según el cual estamos aquí, sea porque las leyes universales prácticamente lo hacen inevitable, siendo la base de la tendencia universal y no al contrario (un principio antropomórfico fuerte, en el cual un evento predeterminado en el pasado remoto formó el universo de la manera como lo hizo, de modo que pudiéramos "existir").

¿Puedo quedarme en casa y jugar?

Si no se modula adecuadamente, la eclosión de la tecnología subyacente a la Red

conlleva una nefasta consecuencia. Su expansión incontrolada podría convertirse en un peligro, tal vez en el mayor peligro que se haya cernido jamás sobre la sociedad, que eclipsaría los problemas de la guerra, la enfermedad, el hambre o las drogas. Lo que debemos temer es la posibilidad de que, con mejores formas de comunicación con los demás, la interacción con el mundo externo deje de parecernos atractiva. Si los problemas sociales de las drogas que alteran la mente son graves, imaginemos lo que sucedería si, comunicándonos virtualmente con otras personas reales o imaginarias, no sólo mediante el sistema visual sino mediante todos los sistemas sensoriales, nuestros sueños se volvieran realidad. Recordemos que la única realidad de que disponemos es la virtual — ¡por naturaleza somos máquinas de sonar! Así, la realidad virtual sólo se alimentaría de sí misma, con el riesgo de destruirnos con ello.

Comparado con el número de horas que gasta la gente al día mirando televisión, el tiempo que se gastará en mundos virtuales será aun mayor, pues ya no se tratará de mirar, sino de interactuar. Se podrá tocar la música que se escuche. Será posible pilotear un avión, cazar elefantes, experimentar contactos sexuales íntimos, todo virtualmente. Lo que se quiera. Al desaparecer los verdaderos límites que definen la realidad, la posibilidad de trastornar la sociedad es prácticamente ilimitada y llevaría a la dependencia intelectual por excelencia, ya que las fronteras definidas por la realidad desaparecerían. Los hechos fundamentales de la vida se cuestionarían seriamente. Surge la posibilidad de crear un estado totalmente hedonista, una sociedad sibarita decadente, que se precipitaría hacia su autodestrucción y el olvido. Todos sabemos que e! placer debe tasarse y no inhalarse demasiado profundamente. Idealmente, el placer no es un fin en "sí mismo", sino el medio para un fin. Si llegamos a un tipo de conciencia colectiva, podría ser una conciencia peligrosamente narcisista, una conciencia que precipitara la desintegración de la sociedad, ya de por sí debilitada por el clima ominosamente anti-intelectual en el cual vivimos.

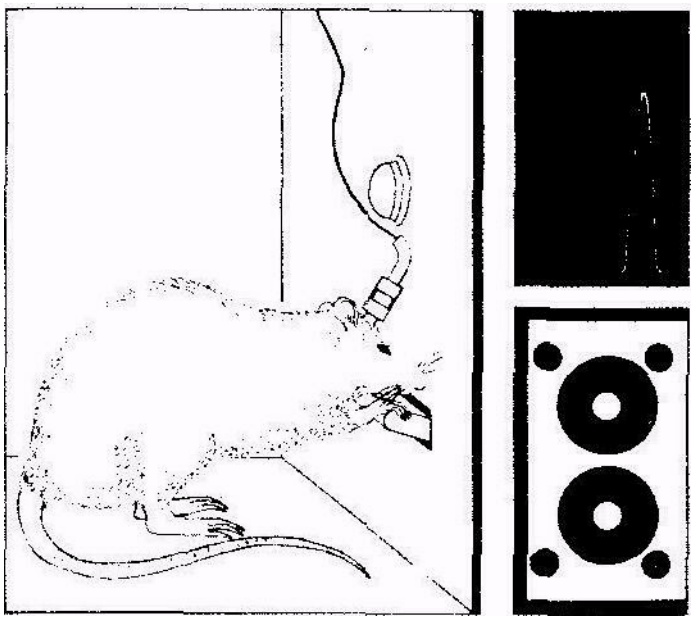


Figura 12.3

Auto estimulación incontrolada. Caja de Skinner para estudiar los efectos comportamentaIes del refuerzo cerebral. Se implantó un electrodo de metal en el sistema de refuerzo de la rata y se le permite estimularse eléctricamente el cerebro, presionando el pedal. La curva en la pantalla del osciloscopio indica el suministro de estímulos. Si el electrodo de estimulación se implanta en el haz medial telencefálico del hipotólamo, la rata se estimulará casi continuamente durante días enteros, haciendo caso omiso de comida, agua y sueño. Los efectos de lo estimulación en otras partes del sistema de refuerzo son menos espectaculares, (Tomado de Routtenberg, 1978.}

La investigación cerebral sabe esto desde hace muchos años. Si se coloca un electrodo de estimulación en el haz medial telencefálico de la rata, el centro de placer del cerebro, y se permite al animal activar esta área presionando una palanca conectada eléctricamente, la rata dejará de comer, de dormir y de beber para mantenerse en un estado de perpetua felicidad. Y se mantendrá así hasta morir (figura 12.3). Esto mismo lleva a los seres humanos a ingerir cocaína hasta la muerte. Al respecto, la realidad virtual sería la palanca más adictiva de cuantas conocemos hoy. La vida misma no es un sueño: se trata de la supervivencia física y de su continuidad. La realidad virtual no satisface esta necesidad. "El comer virtualmente no sostiene al cuerpo.

Es de esperar que, en último término, la sapiencia humana reconozca que este dominio virtual no es real: que de alguna manera, por un capricho, la evolución supo que era posible lograr algo así. Sin que sepamos exactamente cómo, nuestro cerebro evolucionó para impedirnos actuar los sueños generados durante el MOR; evitando que nos lesionemos a nosotros mismos. De manera más realista es de esperar que la evolución resuelva este problema, del mismo modo como resuelve las grandes catástrofes naturales, es decir a través de la variación y de la selección. Puede que unos pocos individuos digan: "No me interesa el sexo en dos dimensiones, quiero sexo de veras". La reducción de la sociedad mediante la selección natural produciría un ser humano diferente, más pensador. Tal vez, esto

sea lo máximo que podemos esperar.

La mente no necesariamente es una propiedad únicamente biológica

Biológicamente hablando, tal vez sea irrelevante que la Red esté viva o no. Si consideramos que cada opinión, creencia o mensaje individual es un estímulo, entonces la Red actúa muy a la manera de la conciencia. Toma decisiones de consenso, rápidas, afirmativas o negativas, acerca de los estímulos de llegada, y genera una solución: sencillamente no hay tiempo para nada más.

Las discusiones de esta naturaleza plantean una pregunta primordial obvia: ¿es la mente una propiedad que sólo puede darse en el dominio de lo biológico, de los seres de carne y hueso?

Consideremos por un momento el vuelo. En el siglo XIII o XIV se concluyó que el vuelo es una propiedad biológica, basándose exclusivamente en que las criaturas vivientes eran los únicos objetos más pesados que el aire que volaban en ese entonces. En cambio, a comienzos del siglo XXI, todos sabemos que el vuelo no es una propiedad exclusiva de entidades biológicas. Igualmente, cabe preguntarse si la mente es una propiedad exclusivamente biológica. No parece que los computadores de hoy en día estén listos para tener una mente, pero ello puede deberse más a limitaciones de diseño arquitectónico que a limitaciones teóricas para crear mentes artificiales. En e! caso del vuelo, el material cutáneo especializado, la cutícula y las plumas, ha demostrado su valor en la amalgama que vence la gravedad, como también lo han demostrado el plástico, la madera seca y diversos metales. No son los materiales sino el diseño lo que define la viabilidad.

Así pues, ¿es la "mente" una propiedad únicamente biológica o es en realidad una propiedad física, que en teoría podría ser soportada por una arquitectura no biológica? En otras palabras, ¿hay alguna duda de que la biología sea diferente de la física? El conocimiento científico acumulado en los últimos 100 años sugiere que la biología, con todo y su sorprendente complejidad, no difiere de los sistemas sujetos a las leyes de la física. Por tanto, sería posible generar la conciencia con base en un organismo físico, que fue lo que ocurrió en nuestro caso, y al cual llamamos "un sistema biológico".

En general, la gente se pregunta si será posible fabricar máquinas cuya naturaleza no sea biológica y que sean capaces de sustentar la conciencia, las cualias, la memoria y el darse cuenta de las cosas, que son las propiedades de la función del sistema nervioso que consideramos realmente importantes. ¿Podrán los computadores llegar a pensar algún día?

La respuesta es afirmativa; creemos que pueden y que lo harán, pero aquí la pregunta más

pertinente es: ¿qué características físicas tendría y como se vería el sistema, antes de poder realizar las mismas tareas que el cerebro? O quizás, como algunos aún lo piensan. ¿hay algo desconocido, espectral o indefinible en el cerebro, eso que la filosofía ha llamado el "problema difícil"? Creo que el problema es más de grados de libertad físicos de la arquitectura funcional, que de la vida que caracteriza la biología en contra de la inercia que caracteriza la materia física.

Dado que toda mi vida he sido un fisiólogo de vertebrados, con algunas incursiones en el mundo invertebrado, he presentado en este libro una imagen de la conciencia que se materializa en un tipo particular de redes neurales o circuitos. Pero debo narrar una de las experiencias más alarmantes que he tenido al estudiar la función cerebral. En algunas discusiones con Roger Hanlin, en el laboratorio de biología marina de Woods Hole, supe que el pulpo es capaz de hazañas de inteligencia realmente extraordinarias. Había leído de los experimentos con pulpos de J. Z. Young (1989), en los cuales estos invertebrados resolvían problemas tan complejos como abrir un frasco para extraer un cangrejo de su interior. Con sólo la imagen visual y claves olfatorias que indicaban la presencia del cangrejo, y manipulando táctilmente el frasco, la criatura finalmente se dio cuenta de que al aplicar fuerza podía quitar la tapa. Posteriormente, ante el mismo problema, el animal abría la tapa inmediatamente para sacar el cangrejo y. sorprendentemente, era capaz de aprender esto en un solo ensayo. Ahora bien, lo más importante es que los pulpos pueden aprender observando a otros pulpos (figura 12.4). Lo alarmante aquí es que la organización del sistema nervioso de este animal es totalmente diferente de la que pensábamos era capaz de soportar este tipo de actividad en el cerebro de los vertebrados (ver Mirlos, 1993). Si nos enfrentamos al hecho de que existen dos soluciones posibles al problema de la "inteligencia", entonces podemos deducir que deben existir muchas otras arquitecturas con los elementos mínimos que sirvan de base para lo que consideramos necesario para la cognición y las cualias. Ahora bien, pese a haber observado una gran inteligencia en animales como el pulpo o la Sepia, estas criaturas de hecho podrían carecer de cualias. Sin embargo, pienso que observando su comportamiento se puede deducir que éste soporta la subjetividad. Según el principio de la parsimonia, quienes creen que estos animales carecen de cualias son quienes tienen que probarlo.

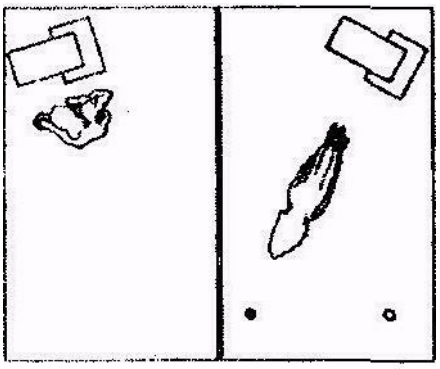


Figura 12.4

H pulpo notable. Esquema del aparato y protocolo experimental. Un Octopus vutgoris (derecho) ataca una pelota (la oscura) y se lo demuestra al otro animal |el observador, a la izquierda), que se hara fuera de su caja y que mira a su compañero durante todo la sesión a través de una pantalla transparente. El suministro de agua corriente a ambos tanques es independiente, Antes de comenzar la fase de observación, los animales podían intefoctuar visualmente durante dos horas. La duración media de los ensayos que dependía de la ejecución del demostrador, era de 40 segundos y el período entre ensayos era de 5 minutos. (Tomado de Rorito y Scotto. 1992, figura 1, p-545.)

Pero ¿hay alguna diferencia esencial entre la materialización de los computadores modernos y el sistema nervioso? Es ésta una pregunta muy seria e importante. Cabe preguntarse, como lo hiciera Alan Turing (Turing, 1947; Millican y Clark, 1996), si en principio, a partir de

un artefacto de tipo digital que implemento los algoritmos apropiados, fuera posible fabricar una máquina universal. ¿Podrá la computación algorítmica ser suficientemente extensa, rápida y concisa como para producir la totalidad de las propiedades generadas por una entidad como nuestro cerebro, con 14 vatios y 1,5 kilogramos de masa? ¿Y qué pensar de la inteligencia de la hormiga que, como un robot, demuestra una increíble agilidad de cómputo con escasos miligramos de masa neuronal, incluso con menos masa que un microchip? El problema fundamental es que los cerebros no tienen nada que ver con los computadores digitales: operan como artefactos analógicos y, por canto, para sus mediciones utilizan directamente la física, al contrario de los ceros y unos abstractos que se liberan de los mismos elementos que los generaron. ¿Puede compararse la computación de los ordenadores digitales con la de los diseños analógicos? Se dice que para que los computadores digitales soporten propiedades de cómputo (capacidades) equivalentes a las del cerebro, se requeriría una masa y potencia superiores a las de los actuales en muchos órdenes de magnitud.

A la luz de las diferencias entre los cerebros y los computadores, hace mucho tiempo Warren McCulloch se preguntó cómo generar datos fiables a partir de sistemas no fiables (McCutloch, 1965). El lector ya sabe que, como entidades de computación, las células nerviosas son poco confiables. En primer lugar, por tener actividad intrínseca, por lo cual como convertidores y trasmisores de información son extremadamente "ruidosos". La respuesta de McCulloch es bien interesante: pensaba que era posible generar un sistema fiable siempre y cuando que las neuronas se organizaran en paralelo para que el mensaje final Riera la suma de su actividad simultánea. Explicaba, además, que si los elementos de un sistema difieren suficientemente entre sí, en cuanto a su no fiabilidad, el sistema en principio sería mucho más fiable que si sólo tuviese partes fiables. En tal caso se logra un sistema fiable, porque la no confiabilidad de cada uno de los elementos se reduce al máximo, aunque no se elimine del todo.

Esto parece casi paradójico, pero si un sistema se considera fiable, entonces sus elementos lo serán en la misma medida. El problema es que, incluso con una fiabilidad del 99,99%, los elementos serán igualmente no fiables, lo cual significa que la pequeña falta de fiabilidad es común a todos los elementos. Lo anterior se convierte en un problema de probabilidad. En tales sistemas confiables o redundantes, por pequeños que sean los problemas o errores de confiabilidad, se sumarán. Sin embargo, como los sistemas no fiables no tienen elementos redundantes y la pequeña falta de confiabilidad es diferente en cada uno de ellos, no hay posibilidad de que los errores se sumen. Por ello, ¡la confiabilidad de estos sistemas no fiables es mayor que la de los sistemas fiables! Lo irónico es que en un sistema con elementos de diferente fiabilidad, lo que tienen en común estos elementos son sus aspectos confiables! Esto es fundamental. Significa que para que un instrumento sea totalmente fiable, debe estar conformado, en últimas, por partes no fiables individualmente, pero variadas.

En esto reside precisamente la fragilidad que la homogeneización de la Red puede ocasionarles a nuestros pensamientos, ideas, creencias y demás. Al reducirse la variabilidad, las cosas se tornan redundantes y la no fiabilidad será lo común a los elementos — en el caso de la sociedad, nosotros somos los elementos.

Volviendo a la implementación de la conciencia y a la llamada inteligencia artificial (no biológica), no se podrá generar la arquitectura necesaria hasta no haber comprendido la naturaleza probabilística y el problema de la falta de confiabilidad de la computación en los sistemas analógicos. Probablemente, con arquitecturas funcionales adecuadas, sería posible generar conciencia en numerosas entidades no biológicas.

El segundo problema es el conocimiento del "sí mismo". Supongamos que se le dé suficiente libertad a determinada materialización de la conciencia para explorar e interiorizar el mundo externo, de modo que implemente una imagen de sí misma, por primitiva que sea. Si bien esta materialización puede evaluar la realidad externa, es probable que nunca llegue a tener una entidad consciente en el sentido humano. Sabemos que esto es fundamental para el funcionamiento del sistema nervioso. Puede observarse en individuos que, a través de prismas invertidos, hacen que el mundo aparezca al revés. Estas personas aprenden a utilizar la imagen

visual como si estuviera derecha sólo si se les permite interactuar motoramente con la imagen. Para ajustarla, tienen que moverse dentro de ella. En último término, vemos que la arquitectura capaz de generar la cognición debe relacionarse con la motricidad sobre la cual tal cognición se desarrolló. Para llegar a ser conscientes, los computadores deben moverse y manipular — deben ser robots. Sin esta autorreferencia, siempre se presentará el problema de la sintaxis contra la semántica (ver el paradigma del cuarto chino; Searle, 1992), pues sencillamente la conciencia siempre es simplemente dependiente del contexto.

Si a la larga se logran arquitecturas que generen cognición, tendremos máquinas de pensamiento y/o sensación. Sin embargo, puede que llegar a diseñarlas y construirlas no nos ayude mucho a comprender la función cerebral, así como comprender los aviones no nos dice mucho acerca de la fisiología del vuelo en murciélagos o pájaros.